



Ana Isabel Gouveia Francisco

Licenciada em Ciências da Engenharia Física

Montagem Didática para Medições de Resistividade de Metais na Gama 77 K a 300 K

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Física

Orientador: Professor Doutor Grégoire Bonfait,
Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Professor Doutor Filipe Tiago Oliveira
Arguente: Professora Doutora Ana Cristina Silva
Vogal: Professor Doutor Grégoire Bonfait



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2018

Montagem Didática para Medições de Resistividade de Metais na Gama 77 K a 300 K

Copyright © Ana Isabel Gouveia Francisco, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*A todas as mulheres que lutaram para que eu pudesse
tornar-me, um dia, Engenheira*

AGRADECIMENTOS

O trabalho que é apresentado neste documento apenas foi possível devido ao apoio de muitas pessoas, que ajudaram e fizeram com que a realização deste trabalho fosse possível.

Por este motivo, gostaria de agradecer ao meu Orientador, Professor Doutor Grégoire Bonfait, que acompanhou todo o processo de construção da montagem didática e que, diariamente, me aconselhava sobre quais as decisões que deveria tomar quanto a este projeto. Graças a este acompanhamento, foi possível que aprendesse todos os dias um pouco mais, sendo cada vez mais autónoma e chegando a um resultado que, para mim, é bastante satisfatório.

Para além do Professor Doutor Grégoire Bonfait, os meus colegas de laboratório e o senhor José Carlos Mesquita, Assistente Técnico do Departamento de Física, foram essenciais para que este trabalho pudesse ser concluído com sucesso, estando sempre disponíveis para responder a qualquer dúvida que surgisse.

Por fim, acabando com os agradecimentos institucionais, gostaria de agradecer à Associação dos Estudantes da FCT/UNL (AEFCT) e, em especial, a todas as pessoas com quem trabalhei diretamente ao longo deste quatro anos de dirigente associativa, por todo o apoio dado no percurso académico e por todo o conhecimento que transmitiram, ajudando-me a desenvolver ferramentas que foram fulcrais para concluir esta etapa. Seria injusto nomear nomes, pois todos os dirigentes com que me cruzei contribuíram de alguma forma para a minha evolução enquanto estudante e pessoa. Queria, também, agradecer à Federação Académica de Lisboa (FAL) que, apesar de apenas estar presente na minha vida deste janeiro, desempenhou um papel essencial na minha aprendizagem. Agradecendo em especial aos meus colegas da Direção Geral que foram sempre muito compreensivos quanto à minha limitação de horários devido à realização desta dissertação, incentivando a priorização da mesma.

Um agradecimento especial às pessoas que constituem o curso de Engenharia Física. Foi um privilégio coexistir neste curso com estas pessoas fantásticas que todos os dias me surpreendem positivamente. O facto de existir uma interação tão forte entre todas as pessoas, independente do seu ano, é essencial para o clima descontraído e de entreajuda que se vive neste curso. Foi um orgulho e uma sorte estar nesta grande família que é Engenharia Física.

Gostaria de agradecer, ainda, aos meus amigos, que durante estes seis meses de trabalho não tiveram uma amiga muito presente e que ouviram-me falar deste trabalho vezes

sem conta, raramente reclamando. Em especial a todos os meus amigos de faculdade, que me ajudaram a evoluir durante estes seis anos de jornada e aos meus amigos de infância com quem convivi muito durante a execução deste trabalho e que foram sempre uma ótima distração, mesmo nos momentos de maior stress.

Dentro dos meus amigos, tenho de agradecer especialmente às minhas amigas Marlene e Belkes, que foram como uma segunda família, acolhendo-me desde o meu primeiro ano. Foram o apoio mais forte nos dias em que chegava a casa muito chateada com os meus fios de ligação ou amostras metálicas, certificando-se sempre que eu dava uma boa gargalhada e via as coisas pelo lado positivo.

Não poderia deixar de agradecer a toda a minha família, a todas as minhas tias, tios e primos que foram sempre muito presentes na minha educação e ensinaram-me a ser persistente e responsável, qualidades essenciais para este trabalho. Quando estamos rodeados de pessoas que nos apoiam é fácil concluir tarefas, mesmo que estas impliquem um esforço diário.

Agradecer ao meu pai que me ensinou, mesmo sem perceber, que é necessário ser resiliente e trabalhar com amor, independentemente do que se esteja a fazer. À minha irmã por sempre ter sido um grande exemplo, tanto na forma como levou os estudos com responsabilidade, como pela sua assertividade, competência e eficiência e, sem dúvida, por sempre me ter apoiado, lembrando-me de todas as partes positivas do processo que foi a vida académica. Agradecer, por fim, ao meu sobrinho que, apesar de ainda ser muito pequenino e de, por motivos geográficos, não passar muito tempo com a tia, é uma inescável fonte de alegria, mesmo que seja apenas por um vídeo ou uma foto, transforma o meu dia e melhorando o meu humor instantaneamente.

Não poderia deixar de agradecer a minha mãe, não só por ter corrigido quase todos os meus erros de concordância deste documento, mas, sobre tudo, por ser a minha inspiração para a vida, tanto na maneira de trabalhar como na maneira de interagir com os outros. A minha mãe ensinou-me a cumprir os meus deveres e que sempre foi um exemplo de trabalhar e de dedicação. Sempre me apoiou em todas as decisões que queria fazer, mesmo que não eram as tradicionalmente esperadas, porque sabia que todas as experiências iriam enriquecer-me e desenvolver em mim capacidades novas. Se o meu sobrinho é uma fonte inescável de alegria, a minha mãe é uma fonte inesgotável de apoio e nem mil palavras poderiam o quanto isso é importante para mim.

*It is not so very important for a person to learn facts. For that he does not really need a college. He can learn them from books. **The value of an education in a liberal arts college is not the learning of many facts but the training of the mind to think something that cannot be learned from textbooks.***

- Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho apresenta a construção de uma montagem didática que pretende estudar a resistividade elétrica de metais e a sua alteração com a variação da temperatura. A necessidade da criação desta montagem deve-se ao facto do material comercial para a realização desta atividade ser escasso ou pouco didático. Assim, foi projetado e construído um sistema que permitiu a medição da resistência de quatro amostras entre 77 K, temperatura do azoto líquido, e a temperatura ambiente.

Para que isto fosse possível, foram desenhadas as peças da célula térmica, onde são colocadas as amostras. A resistência das amostras é medida pelo método dos quatro pontos, utilizando uma placa de aquisição de dados especialmente escolhida para gerar uma corrente e medir as tensões aos terminais das amostras. Foi desenvolvido um programa que comunique com esta placa, permitindo acompanhar a evolução das temperaturas e resistividades das amostras.

Com esta montagem didática foi possível realizar medições, apresentadas neste documento, com quatro amostras em simultâneo. Foram medidas amostras de Cobre, Ouro, Alumínio, Platina e chumbo.

O resultado destas medidas foram utilizados para comprovar o modelo de Bloch-Grüneisen. Esta atividade poderá ser integrada na Unidade Curricular de Física do Estado Sólido, onde são abordadas estas temáticas, enriquecendo a aprendizagem dos estudantes sobre as mesmas.

Palavras-chave: Resistividade elétrica; Lei de Bloch-Grüneisen; Temperatura de Debye.

ABSTRACT

This work presents the construction of a didactic assembly that intends to study the electrical resistivity of metals and its change with temperature variation. The need to create this assembly was due to the fact that the commercial material to carry out this activity is scarce or not very didactic. This system was designed and constructed in order to allow the measurement of the resistance of four samples between 77 K, liquid nitrogen temperature, and room temperature.

To make this possible, the pieces of the thermal cell, where the samples are placed, were designed. The sample resistance is measured by the four point method using a specially chosen multichannel data loggers to generate a current and measure the voltages at the sample terminals. It was developed a program that communicates with this plate, allowing to follow the evolution of temperatures and resistivities of the samples.

With this didactic assembly it was possible to carry out measurements, presented in this document, with four samples simultaneously. Samples of copper, gold, aluminum, platinum and lead were measured.

The results of these measurements were used to prove the Bloch-Grüneisen model. This activity can be integrated into the Solid State Physics Curricular Unit, where these themes are addressed, enriching students' learning about them.

Keywords: Electrical Resistivity; Bloch-Grüneisen model; Debye temperature.

ÍNDICE

Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xix
1 Introdução	1
2 Conceitos Teóricos	3
2.1 Modelo de Drude	3
2.2 Teoria de Bloch	4
2.3 Temperatura de Debye	5
2.4 Regras de Matthiessen	6
2.4.1 Resistividade Residual	6
2.4.2 Resistividade Intrínseca	6
2.4.3 Relação entre Resistividade Residual e Resistividade Intrínseca . .	6
2.5 Relação de Bloch-Grüneisen	8
3 Estado da Arte	11
3.1 Projeto e Estágio - Criomóvel	11
3.2 Trabalhos Práticos	12
3.3 Material Didático	13
4 Metodologia e Sistema Experimental	17
4.1 Metodologia Global da Experiência	17
4.2 Medição da Resistência pelo Método dos Quatro pontos	18
4.3 Medição da Temperatura	19
4.4 Organização e Funcionamento do Sistema	20
4.5 Funcionamento e implementação da Placa de Aquisição PicoLog ADC-24	21
4.6 Peças e Ligações do Sistema Criogénico	23
4.7 Preparação das Amostras	26
4.8 Programa da plataforma LabVIEW	27
4.9 Montagem Didática completa	30
5 Resultados Experimentais	33
5.1 Variação da Temperatura	34

5.1.1	Teste com cinco platinas	35
5.2	Medição das Tensões	36
5.3	Resistividade em Função da Temperatura	37
5.3.1	Avaliação e testes às medidas	42
5.4	Modelo de Bloch-Grüneisen	44
6	Conclusões	47
	Bibliografia	49
A	Protocolo Experimental	51
B	Peças da Célula Térmica	67
I	Datasheet da Placa de Aquisição PicoLog ADC-24	75

LISTA DE FIGURAS

2.1	Esquema da trajetória dos eletrões sugerida por Drude.	3
2.2	Comportamento da resistividade com diferentes concentrações de impurezas	7
2.3	Gráfico da função de Bloch-Grüneisen juntamente com alguns pontos experi- mentais.	9
3.1	Esquema do trabalho realizado pelo aluno João Wemans no seu Projeto de Estágio.	12
3.2	Fotografia do Dispositivo <i>High/Low Temperature Macor/Glass Four Point Probe Head</i> comercializado pelo Bridge Technology	15
3.3	Fotografia do Dispositivo <i>Jandel CYL-RM3000 Four Point Probe System</i> comer- cializado pelo Bridge Technology	15
3.4	Fotografia do kit <i>Temperature dependence of different resistors and diodes</i> comer- cializado pelo PHYWE	15
4.1	Esquema do sistema montado neste trabalho.	17
4.2	Ilustração de uma medição pelo método de quatro pontos.	19
4.3	Esquema do sistema utilizado para medir a resistência da Pt-100 utilizada como termómetro.	19
4.4	Esquema do sistema quando a corrente é produzida pela Placa de Aquisição PicoLog ADC-24.	21
4.5	Esquema do sistema quando a corrente é produzida por uma fonte externa. .	21
4.6	Placa de Aquisição ADC-24	22
4.7	Fotografia da placa de ligação com da placa de aquisição ADC-24.	23
4.8	Conjunto de peças que formam a célula térmica	24
4.9	Fotografias da célula térmica	25
4.10	Esquema ilustrativo das ligações efetuadas ao conector	25
4.11	Fotografias das amostras utilizadas no sistema	26
4.12	Esquema ilustrativo da montagem das amostras	27
4.13	Printscreen da plataforma LabVIEW	28
4.14	Printscreen da plataforma LabVIEW - dimensões das amostras	29
4.15	Printscreen da plataforma LabVIEW - escala de tensões e conversões de tempo	29
4.16	Cabeçalho do ficheiro criado pela plataforma LabVIEW	30
4.17	Fotografias da montagem didática completa	31

5.1	Variação da temperatura na medição B	34
5.2	Esquema da montagem de cinco Pt-100 na célula térmica.	35
5.3	Evolução da temperatura medida através de cinco plantinas 100 Ω	36
5.4	Gráfico dos resultados do teste realizado às cinco Pt-100 posicionadas na célula térmica	37
5.5	Evolução das tensões aos terminais das amostras metálicas durante o seu aquecimento referentes à medição B	38
5.6	Comparação entre as curvas de resistividade em função da temperatura da amostra de alumínio da <i>medição A</i> e as curvas tabeladas.	39
5.7	Comparação entre as curvas de resistividade em função da temperatura da amostra de ouro da <i>medição A</i> e as curvas tabeladas.	39
5.8	Comparação entre as curvas de resistividade em função da temperatura da amostra de cobre <i>medição A</i> e as curvas tabeladas.	39
5.9	Comparação entre as curvas de resistividade em função da temperatura da amostra de ouro da <i>medição B</i> e as curvas tabeladas.	40
5.10	Comparação entre as curvas de resistividade em função da temperatura da amostra de cobre da <i>medição B</i> e as curvas tabeladas.	40
5.11	Comparação entre as curvas de resistividade em função da temperatura da amostra de chumbo da <i>medição B</i> e as curvas tabeladas.	41
5.12	Resistividade em função da temperatura de todas as amostras presentes na medição A	41
5.13	Resistividade em função da temperatura de todas as amostras presentes na medição B	41
5.14	Exemplo de gráfico das tensões parasitas para temperatura ambiente	43
5.15	Resistência reduzida em função da temperatura reduzida de todas as amostras presentes na medição A	45
5.16	Resistência reduzida em função da temperatura reduzida de todas as amostras presentes na medição B	46
5.17	Resistência reduzida em função da temperatura reduzida de todas as amostras presentes na medição A e B	46

LISTA DE TABELAS

4.1	Correspondência entre as resistências, os seus terminais e valores.	23
4.2	Materiais utilizados para construir as peças que compõem a montagem didática.	25
4.3	Correspondência entre os títulos do cabeçalho do ficheiro gerado pelo LabVIEW e o seu significado.	30
5.1	Dimensões das amostras da <i>medição A</i> realizada no dia 24 de maio de 2018 com fonte de corrente interna	33
5.2	Dimensões das amostras da <i>medição B</i> realizada no dia 25 de julho de 2018 com fonte de corrente externa	34
5.3	Comparação entre as medições de resistência do conector DB25 teste efetuadas pelo sistema (placa de aquisição PicoLog ADC-24 e programa LabVIEW) e pelo multímetro digital Agilent 34401A.	42
5.4	Comparação entre as medições de resistência do conector DB25 teste efetuadas pelo sistema (placa de aquisição PicoLog ADC-24 e programa LabVIEW) e pelo multímetro digital Agilent 34401A.	43
5.5	Temperaturas de Debye de cada metal utilizado nas medições efetuadas. [26]	44
5.6	Valores da Resistência das diferentes amostras da <i>medição A</i> à temperatura de Debye.	45
5.7	Valores da Resistência das diferentes amostras da <i>medição B</i> à temperatura de Debye.	45

INTRODUÇÃO

As atividades laboratoriais ajudam os estudantes a absorver o conhecimento lecionado nas aulas teóricas, assim como a apreender utilizar e montar aparelhos de medidas. Desta forma, é essencial existir uma forte componente laboratorial, principalmente em cursos ligados à Ciência e à Engenharia. Porém, nem toda a matéria teórica poderá ser transportada para um panorama prático, devido às limitações de espaço, preço e tempo de duração da atividade prática.

Na Unidade Curricular de Física do Estado Sólido, lecionada no 3º ano de Mestrado Integrado em Engenharia Física (MIEF) na FCT/UNL, existe uma forte componente prática que conta com as seguintes atividades práticas: Difração de Raio-X ; Termopares e Coeficiente de Seebeck; Termístores e Coeficiente de temperatura (25°C a 90°C); Ferro-magnetismo e Ciclo de histerese; Efeito de Hall e Densidade e mobilidade de carga e Eletroluminescência e Constante de Planck . No entanto, apesar do vasto leque de atividades práticas existente no plano curricular, esta Unidade Curricular não existe nenhuma atividade laboratorial que aborde a medição de resistividade elétrica e a relação desta com a variação da temperatura entre a temperatura ambiente e a temperatura do azoto líquido.

O trabalho apresentado neste documento teve como objetivo realizar uma montagem didática que irá ser utilizada para medir a resistividade elétrica de amostras metálicas na gama de temperatura 77-300 K. A partir da medição desta grandeza, serão comparados os valores obtidos com os valores tabelados e analisada a sua relação com a temperatura.

A partir destas medidas e dos resultados analisados será possível estudar a modelo de Bloch-Grüneisen. O modelo prevê que $\rho/\rho(\theta)$ depende apenas de T/θ , onde θ é a temperatura de Debye.

Esta montagem didática e a inclusão de uma atividade que analise a relação da variação destas duas grandezas é uma grande mais-valia para a componente prática da

Unidade Curricular, assim como para os conhecimentos dos estudantes.

Verificou-se a necessidade de desenhar e projetar todo o material didático para o desenvolvimento desta atividade pois, existem poucos materiais didáticos com esta finalidade à venda e os materiais existentes apenas nos permitem efetuar medições a temperaturas altas (temperaturas iguais ou superiores a temperatura ambiente) e medir a resistividade de somente uma amostra metálica. Deste modo, foi necessário criar um sistema simples e móvel que satisfizesse as necessidades desta atividade, podendo ser arrefecido por azoto líquido até 77 K e, posteriormente, aquecido até a temperatura ambiente, de forma a permitir a análise de quatro amostras metálicas em simultâneo.

Para explicitar todo o processo de construção da montagem didática e os resultados obtidos pela mesma, o presente documento está dividido em seis capítulos, sendo o primeiro esta introdução ao trabalho realizado; o seguinte uma breve introdução aos conceitos teóricos abordados neste trabalho; o terceiro será o estado da arte onde é feito o ponto de situação dos materiais didáticos e atividades práticas semelhantes ao trabalho desenvolvido; o quarto capítulo é o da metodologia e sistema experimental, onde serão explicados os dimensionamentos do sistema e as escolhas feitas na realização deste projeto; o quinto será o capítulo de resultados experimentais, onde serão apresentados os resultados obtidos pelo sistema desenvolvido e, por fim, o capítulo das conclusões, que irá resumir as principais conclusões a retirar deste trabalho. No apêndice A encontra-se, ainda, o protocolo escrito para a atividade prática, onde será utilizada esta montagem didática.

CONCEITOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão introduzidos alguns conceitos teóricos sobre o comportamento dos íons e elétrons nos sólidos, assim como algumas teorias que explicam os princípios fundamentais da origem da resistência elétrica.

2.1 Modelo de Drude

O Modelo de Drude [1, 2], sugerido por Paul Drude em 1900, foi um modelo essencial para a compreensão dos conceitos de resistividade e condutividade elétrica.

Este modelo descreve os metais como sólidos onde os íons são estacionários na rede cristalina e os elétrons de valência são considerados partículas carregadas que se movem livremente e colidem com os íons, tal como descrito na figura 2.1. As colisões são acontecimentos instantâneos que reduzem drasticamente a velocidade do elétron

Quando não existe um campo elétrico aplicado, este modelo descreve as trajetória dos elétrons como trajetórias aleatórias, ignorando as interações elétron-elétron (*Aproximação de Elétron Independente*) e as interações elétron-ião (*Aproximação do Elétron Livre*) entre as colisões.

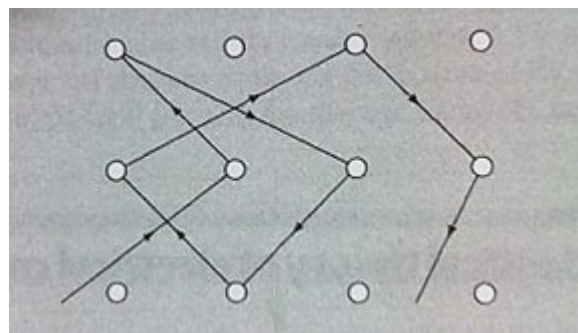


Figura 2.1: Esquema da trajetória dos elétrons sugerida por Drude. [2]

Devido às semelhanças entre os elétrons no metal e as moléculas num Gás Perfeito, foi desenvolvido uma teoria similar à da teoria cinética dos gases. Começou por usar os conceitos de velocidade média (v_t), velocidade média do elétron que percorre o metal; livre percurso médio (λ), distância média que um elétron percorre entre duas colisões sucessivas; tempo de colisão (τ), tempo médio que decorre entre duas colisões sucessivas e a frequência de colisão ($1/\tau$).

Quando uma diferença de potencial é aplicada no metal, um campo elétrico é criado e, consequentemente, os elétrons tendem a seguir a direção do polo positivo. Mesmo sendo este o sentido preferencial, continuam a existir colisões entre os elétrons e os iões e, por esse motivo, alguns elétrons de condução continuam parte da sua trajetórias de forma aleatórias. Contudo, existe sempre uma influência da força elétrica nestas trajetórias, havendo sempre uma tendência na direção do polo positivo.

Esta resistência ao movimento das partículas descrita pelo modelo de Drude explica o fenómeno da resistividade elétrica, assim como o Efeito de Joule, pois existe transferência de energia dos elétrons para os iões nas colisões, justificando a relação entre o aumento da corrente e o aumento do calor do metal.

No quadro deste modelo, a condutividade elétrica pode ser calculada pela seguinte fórmula [1, 2]:

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \quad (2.1)$$

Onde n é a densidade volumica de elétrons de condução, e é a carga de um elétron, m é a massa do elétron.

Por sua vez, a resistividade é calculada por:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m}{ne^2\tau} \quad (2.2)$$

No entanto, esta teoria é profundamente clássica e, por esse motivo, apresenta algumas falhas que não permitem descrever os fenómenos de interação entre os elétrons e os iões de um sólido.

2.2 Teoria de Bloch

Na Teoria de Drude definimos os iões como partículas inertes, ignorando as interações eletrostáticas elétron-ião e elétron-elétron. Assim, precisamos de ter em conta estas interações, principalmente a interação ião-elétron, para poder formular uma teoria que descreva mais corretamente possível a interação entre os iões e os elétrons e, por sua vez, a resistividade elétrica.

Félix Bloch resolveu, pela primeira vez, em 1925, a equação quântica para um elétron numa rede cristalina perfeita. Esta solução deduz a função de onda do elétron como uma onda com a mesma simetria de translação da rede cristalina, consequentemente o elétron irá movimentar-se na rede sem nunca colidir com iões ou ser deflectido pelas mesmos.

Segundo esta resolução não existem interferências na trajetória do eletrão porque a rede cristalina tida em conta é perfeita. A dispersão dos eletrões, ou seja, a origem da resistividade elétrica, advém de imperfeições da rede.

1. **Os iões não estão num estado estacionário.** Os iões da rede cristalina estão em contínua vibração em torno da sua posição de equilíbrio. Assim, devido a estas vibrações que são quantificadas por fonões, a rede cristalina não pode ser considerada perfeita, não havendo simetria de translação. Consequentemente, a solução de Bloch deixa de ser válida e as imperfeições da rede levam à dispersão dos eletrões que transferem energia cinética para a rede cristalina;
2. **A presença de impurezas.** Quando existem impurezas no metal, a trajetória do eletrão também é afetada devido à perda de simetria de translação, principalmente quando o ião da impureza é significativamente maior ou tem uma carga diferente do ião da rede cristalina;
3. **As imperfeições na estrutura da rede cristalina.** Por vezes, algumas lacunas na rede cristalina ou outras falhas estruturais quebram, também, a simetria da rede, podendo fazer com que os eletrões sejam defletidos da sua trajetória inicial.

Assim, percebemos que não existem colisões entre os iões e os eletrões mas sim, defleções devido à sua interação eletrostática e às imperfeições da rede cristalina. No entanto, no que toca à trajetória dos eletrões, a Teoria de Drude apresenta uma solução bastante semelhante à de Bloch. Por esse motivo, os conceitos introduzidos pelo modelo clássico relacionado com esta teoria continua a poder ser usados.

2.3 Temperatura de Debye

A temperatura de Debye (θ) [3] é uma consequência do Modelo de Debye que estuda as vibrações das partículas constituintes da estrutura cristalina dos sólidos. Esta temperatura é a temperatura correspondente ao modo normal (fonão) de maior energia de vibração da rede cristalina. É dada pela expressão seguinte :

$$\theta = \frac{h\nu_{max}}{k} \quad (2.3)$$

Onde h é a constante de Plank, ν_{max} a frequência máxima de vibração ou frequência característica e k é a constante de Boltzmann.

A frequência característica é dada pela seguinte expressão:

$$\nu_{max} = v_s \left(\frac{3N}{4V\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.4)$$

Onde $\frac{N}{V}$ é a densidade de átomos do cristal e v_s é a velocidade do modo normal de vibração, ou seja, velocidade do som no cristal.

Assim, percebemos que a Temperatura de Debye é uma temperatura característica de cada material que depende da densidade de átomos do mesmo, sendo a sua determinação, de certo modo, a determinação da rigidez da rede cristalina.

2.4 Regras de Matthiessen

Existem dois tipos de resistividade elétrica que podem ser relacionadas entre elas através da Regra de Matthiessen.

2.4.1 Resistividade Residual

A temperaturas muito baixas o número de fonões é muito baixo e a dispersão dos elétrons de condução nos metais baseia-se apenas nas colisões causadas por imperfeições na estrutura cristalina ou por presença de impurezas. Estas dispersões originam uma resistividade que é residual, estando presente até a $T=0$ K, e que não depende da temperatura pois o número e a geometria destes defeitos não dependem desta.

A resistividade residual (ρ_{res}) [4, 5] depende exclusivamente das impurezas presentes no metal e dos defeitos estruturais. A sua estrutura somente afetará a resistividade total do metal a baixas temperaturas, onde predomina, em relação à resistividade intrínseca, que será explicada na próxima subsecção.

Para saber o valor deste tipo de resistividade, dado a existência de tantos tipos de impurezas e possíveis imperfeições da estrutura, o melhor método seria medir a resistividade quando o metal é arrefecido até baixas temperaturas.

2.4.2 Resistividade Intrínseca

Quando a temperatura sobe, o número de fonões, ondas ligadas às vibrações térmicas dos iões, aumenta e as colisões elétron-fonão acabam por ser o efeito dominante para a dispersão dos elétrons.

A resistividade (ρ_i) [5] tem uma dependência em relação à temperatura traduzida através da fórmula de Bloch-Grüneisen, que será explorado mais à frente. Esta resistividade é denominada de resistividade intrínseca, por traduzir uma característica intrínseca ao material, sendo o seu valor independente da concentração de defeitos e características do metal puro.

2.4.3 Relação entre Resistividade Residual e Resistividade Intrínseca

A resistividade total de um metal é dada por:

$$\rho(T) = \rho_{res} + \rho_i(T) \quad (2.5)$$

Esta expressão é nomeada de Regra de Matthiessen [5–7]. Para temperaturas abaixo de $T=20$ K (podendo variar dependendo da pureza dos metais) a resistividade é aproximadamente igual à resistividade residual e só quando a temperatura é superior a $T=20$ K (esta

temperatura pode variar dependendo do metal e da sua pureza), é que a resistividade intrínseca começa a tornar-se dominante .

A regra de Matthiessen está relacionada com a ideia mais geral da soma de contribuições de resistividade que derivam de diferentes fontes. Estas contribuições podem ser, como já referida, correspondentes a impurezas do metal, defeitos na estrutura do mesmo, entre muitos outros.

Na Figura 2.2, está representada a evolução da resistividade elétrica em relação à temperatura tanto do cobre como do alumínio. Nestas figuras conseguimos perceber que, a baixa da temperatura, dependendo das concentrações das impurezas (estruturais ou químicas) e dos metais analisados, existe um comportamento diferente da resistividade, tal como previsto pela Regra de Matthiessen. Conseguimos verificar que para o Alumínio, por exemplo, quando este é quase puro (99,999 % Al), apenas a $T \leq 8$ K começa a ser perceptível que as interações predominantes são as dos elétrons com as impurezas, pois a resistividade não varia com a temperatura. Quando analisamos a curva de uma amostra menos pura (99,7 % Al), esta mudança de comportamento já acontece aos ≈ 20 K, até aí, predomina a resistividade intrínseca.

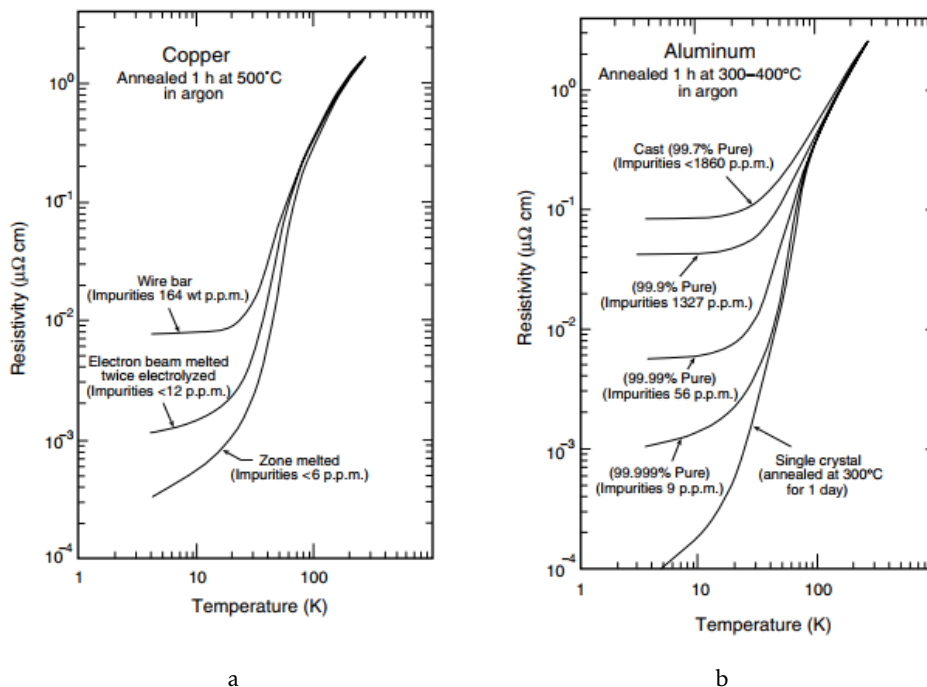


Figura 2.2: Comportamento da resistividade com diferentes concentrações de impurezas: a) Amostra de Cobre e b) Amostra de Alumínio [5].

2.5 Relação de Bloch-Grüneisen

Usando como ponto de partida o Modelo de Drude, o Modelo de Bloch e algumas relações estudadas por Eduard Grüneisen, surgiu uma relação entre a temperatura e a resistividade, proveniente da dispersão dos fonões. Esta relação é chamada de fórmula de Bloch-Grüneisen [4–8] e relaciona estas duas grandezas da seguinte forma:

$$\rho_i(T) = \frac{C}{M\theta} \left(\frac{T}{\theta} \right)^5 \int_0^{\frac{\theta}{T}} \frac{z^5 e^z}{(e^z - 1)^2} dz \quad (2.6)$$

Onde T representa a temperatura, θ representa a temperatura de Debye, uma característica do sistema de fonões do metal, M é a massa atômica e C uma constante que depende do metal em causa.

Quando estudamos os limites da equação 2.6, obtemos dois tipos de simplificações desta relação [4–6].

Regime de Baixa Temperatura :

$$\rho_i(T) = 124,431 \frac{C}{M\theta} \left(\frac{T}{\theta} \right)^5, T \leq (\theta/10) \quad (2.7)$$

Regime de Alta Temperatura :

$$\rho_i(T) = \frac{C}{4M\theta} \left(\frac{T}{\theta} \right), T \geq (\theta/2) \quad (2.8)$$

As equações 2.7 e 2.8 são as mais utilizadas em contextos reais, pois abrangem uma grande gama de temperaturas.

Quando considerada a relação de Bloch-Grüneisen no regime de baixas temperaturas, percebemos que existe uma dependência com T^5 e, quando considerado o regime de altas temperaturas, a relação de dependência é com T . No entanto, os metais estão, normalmente, expostos ao regime da alta temperatura.

Independentemente do regime de temperaturas, podemos afirmar, segundo este modelo, que a resistividade reduzida $\frac{\rho(T)}{\rho(\theta)}$ é uma função de $\frac{T}{\theta}$ para qualquer metal. Para mostrar esta dependência, simplificamos a expressão 2.6, transformando-a na expressão equivalente 2.9. Quando considerada esta expressão para a temperatura de Debye, obtemos a expressão 2.10.

$$\rho_i(T) = \frac{C}{M\theta} \left(\frac{T}{\theta} \right)^5 \int_0^{\frac{\theta}{T}} f(z) dz \quad (2.9)$$

$$\rho(\theta) = \frac{C}{M\theta} \int_0^1 f(z) dz \quad (2.10)$$

Quando dividido $\rho(T)$ por $\rho(\theta)$ obtemos a expressão 2.11 que pode ser simplificada na expressão 2.12 que demonstra que a resistividade reduzida é uma função da temperatura reduzida.

$$\frac{\rho(T)}{\rho(\theta)} = \left(\frac{T}{\theta}\right)^5 \frac{\int_0^{\frac{\theta}{T}} f(z) dz}{\int_0^1 f(z) dz} \quad (2.11)$$

$$\frac{\rho(T)}{\rho(\theta)} = f\left(\frac{T}{\theta}\right) \quad (2.12)$$

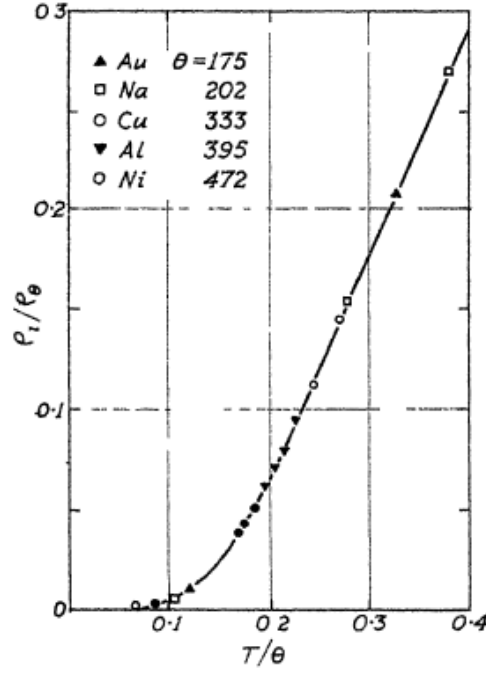


Figura 2.3: Gráfico da função de Bloch-Grüneisen juntamente com alguns pontos experimentais. [4].

No gráfico da Figura 2.3 podemos observar a verificação desta lei para ouro, sódio, cobre, alumínio e níquel. As curvas destes metais sobrepõem-se devido à interação dos elétrons com os fonões da estrutura cristalina ser descrita pela mesma relação entre estas duas grandezas. Podemos também verificar que o regime ρ proporcional a T é atingido quando $\frac{T}{\theta} = 0,2$.

Este gráfico expressa os resultados que os estudantes deverão obter no fim da atividade prática, utilizando a montagem didática descrita no documento. Através destes resultados poderão verificar experimentalmente a Lei de Bloch-Grüneisen e a sua aplicação direta na resistividade dos metais.

ESTADO DA ARTE

Neste capítulo serão apresentados alguns trabalhos e produtos semelhantes ao trabalho que será apresentado nos próximos capítulos. No entanto, a grande maioria destas atividades apenas funciona numa gama de temperaturas superior à temperatura ambiente ou não tem as dimensões ou mobilidade necessários à finalidade da montagem.

3.1 Projeto e Estágio - Criomóvel

O trabalho proposto neste relatório foi abordado no projeto de estágio do João Wemans, na altura estudante de Engenharia Física na FCT/UNL, em 2002 [9]. Estes dois projetos têm semelhanças, desde o objetivo principal que seria demonstrar a Relação de Bloch-Grüneisen, como no método de medição da grande temperatura e outras grandezas.

Este projeto propôs-se a medir a corrente e a diferença de potencial às extremidades de uma amostra metálica, de forma a poder obter a resistência pela Lei de Ohm e, por sua vez, obter a resistividade elétrica através da expressão:

$$\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha_0(T - T_0)) \quad (3.1)$$

A montagem utilizada para este fim está explícita na Figura 3.1. Podemos verificar que exista uma fonte de corrente e a grandeza medida seria a tensão.

Neste caso, foi construído um recipiente que estava em vácuo, onde foi colocada a cápsula que continha a amostra metálica que seria testada. Este recipiente é inserido em azoto líquido (77 K) e é observado o comportamento da resistividade em relação ao arrefecimento.

A temperatura é controlada através de uma resistência de platina 100 Ω (Pt-100), tal como na montagem apresentada neste documento. No entanto, este sistema necessitava de um controlador PID que estabilizasse a temperatura durante as medidas. Este controlador apresenta duas grandes desvantagens: encarece o sistema e torna a execução

do procedimento mais complexa e demorada devido à necessidade de ajustar os seus parâmetros no início de cada medição.

O uso de um sistema de vácuo neste trabalho também era necessário mas, apesar dos sistemas de vácuo serem simples, principalmente nas ordens de grandezas em que este sistema se proponha a trabalhar, este sistema é relativamente caro e dificultava a finalidade didática deste projeto, pois seria necessário preparar o vácuo com alguma antecedência, não sendo possível que os estudantes participassem em todo o processo experimental envolvido na atividade.

Para além destas grandes desvantagens, era ainda necessário a utilização de uma Fonte de Corrente, de um Microvoltímetro, do Estágio de Potência e 5 litros de azoto líquido, que tornavam este equipamento ainda mais dispendioso, de difícil mobilidade e que necessitaria de ocupar mais tempo do que o previsto para uma atividade prática, não apresentando uma melhoria significativa em relação aos resultados obtidos com o sistema que será apresentado neste documento.

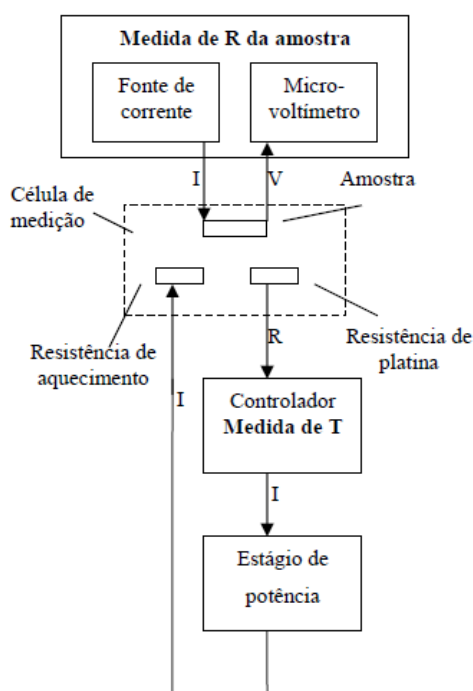


Figura 3.1: Esquema do trabalho realizado pelo aluno João Wemans no seu Projeto de Estágio. [9]

3.2 Trabalhos Práticos

Na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, como já foi referido na introdução ao tema, a Unidade Curricular (UC) de Física do Estado Sólido tem duas atividades que abordam a variação de propriedades físicas dos materiais em função

da temperatura, sendo elas *Termopares - Coeficiente de Seebeck* e *Termístores - Coeficiente de temperatura*. Na última, o principal objetivo é relacionar a resistência elétrica do material com a variação de temperatura [10].

Nesta atividade o termístor, semiconductor cuja variação da resistência com a temperatura é conhecida, é mergulhando num recipiente com água que, mais tarde, será aquecida. Aos terminais do termístor estará ligado um ohmímetro, de forma a ser medida a variação da resistência e, mergulhado na água, estará um termómetro que irá indicar a temperatura da água, que, por sua vez, será também a temperatura do termístor.

É registada a temperatura inicial e a resistência inicial do termístor, depois de ser iniciado o aquecimento são registados os valores da temperatura e da resistência de 5°C em 5°C até atingir uma temperatura de 90°C (363,15 K). Posteriormente, estes dados são tratados de forma a perceber se os dados obtidos respeitam a fórmula que relaciona a temperatura de um termístor NTC com a temperatura, equação 3.2.

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{\beta} \ln \left[\frac{R}{R_0} \right] \quad (3.2)$$

Onde α_0 é o Coeficiente de temperatura a T_0 e ρ_0 é a resistividade do metal a T_0 .

Na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, na UC de Física Experimental II existe, também, uma atividade prática que aborda a dependência da resistividade com a temperatura (Variação com a temperatura da resistência elétrica de metais e semicondutores) [11].

A temperatura de referência é obtida por um sensor que está num banho de gelo, de forma a obter uma temperatura constante (ponto triplo da água a 0°C). Como esta atividade tem temperaturas a aumentar 1 K por minuto entre 283,15 K e 353,15 K, os cálculos da resistividade intrínseca do material será comparado à equação 3.1.

Assim, é esperado que os estudantes observem o aumento da resistividade quando aumentada a temperatura, consequência direta da diminuição do livre percurso médio dos eletrões.

A atividade abrange também o comportamento de semicondutores, sendo usada a mesma montagem experimental e apenas havendo uma diferenciação no tratamento de dados, que se deve às diferenças das interações nestes dois tipos de materiais.

Apesar de quase todos os Planos Curriculares de Engenharia Física terem uma UC de Física do Estado Sólido ou uma UC semelhante onde aborda estes temas, não foi possível saber se existiriam trabalhos práticos neste tema noutras Instituições de Ensino Superior.

3.3 Material Didático

Existem algumas empresas que comercializam material laboratorial e/ou didático com a finalidade de relacionar a temperatura com a resistência ou resistividade.

A experiência didática *Resistivity Experiment* comercializada pela empresa Pasco [12], por exemplo, aborda a resistividade e a sua relação com a resistência. No entanto, é

muito clássica e apenas mede a resistência de vários fios e relaciona estes valores com a geometria e o metal, não contemplando a relação com a temperatura, foco essencial do nosso trabalho.

A empresa Bridge Technology, apesar de não produzir material didático, tem uma vasta gama de equipamentos que utilizam o método de quatro pontos em vários aparelhos, desenvolvendo vários tipos de sondas que têm como base este método, sendo constituídas por quatro pequenos contactos protegidos que efetuam as medições. Existem vários equipamentos que conseguem medir a resistência, no entanto, fazem-no numa cápsula fechada, limitando a mobilidade do aparelho e o número de materiais a serem analisados. Contudo, existem dois modelos em que esta sonda é móvel:

O *Jandel CYL-RM3000 Four Point Probe System* [13, 14] apresenta na Figura 3.3 é um aparelho de pequena dimensão, podendo ser adaptado a um sistema mais amplo; O *High/Low Temperature Macor/Glass Four Point Probe Head* [15, 16], que pode ser observado da Figura 3.2 tem uma gama de temperaturas mais alargada (77 K a 500 K), porém estes dois equipamentos são produzidos com o objetivo final de fazer a medição da resistividade para profissionais e, por esse motivo, são muito fechados. Para além disso, apenas conseguem efetuar a medição de um material de cada vez.

A empresa PHYWE vende kits didáticos para vários níveis de ensino e sobre os diferentes ramos da ciência. Entre estes kits, existem algumas experiências que poderiam ser adaptadas de forma a obtermos os resultados pretendidos. No entanto, existem duas experiências que abordam este tema de uma forma mais específica:

A experiência *Temperature dependence of different resistors and diodes* [17, 18], que podemos ver na Figura 3.4, é uma atividade concebida para que seja possível observar a dependência da resistência com a temperatura. O aquecimento, neste caso, é efetuado através da imersão na água; A experiência *4 Point Method/ Measurement of low resistances/ Ohm's Law* [19, 20] tem como base a medição por quatro pontos, tal como se realizado no nosso projeto, no entanto esta não aborda a variação da temperatura.

Por fim, a empresa Acumen Labware produz um modelo *Four Probe Method, AL-212* [21], que está desenhado para analisar a resistividade de Semicondutores pelo Método de Quatro Pontos a diferentes temperaturas. Este equipamento consiste numa sonda, local para colocar o filme da amostra e um pequeno forno que consegue dar-nos uma variação de temperatura de 273,15K a 473,15K. Apesar desta experiência não ser comercializada especificamente para estudar a relação entre a resistência e a temperatura, pode ser adaptada para tal. Existem algumas Universidades Indianas a utilizarem este aparelho para demonstrar esta relação nas suas atividades práticas.

Percebemos facilmente que nenhum dos equipamentos comercializados irá fornecer-nos os resultados pretendidos e, apesar de haver alguns equipamentos que poderiam ser adaptados ao nosso sistema, estes são caros e não seriam mais benéficos para este projeto de raiz.

É, por este motivo, que é necessário colmatar estas falhas criando uma montagem didática que possa medir a resistividade numa gama de temperaturas entre 77 K e 300 K.

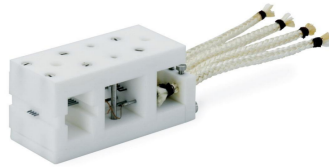


Figura 3.2: Fotografia do Dispositivo *High/Low Temperature Macor/Glass Four Point Probe Head* comercializado pelo Bridge Technology [15].

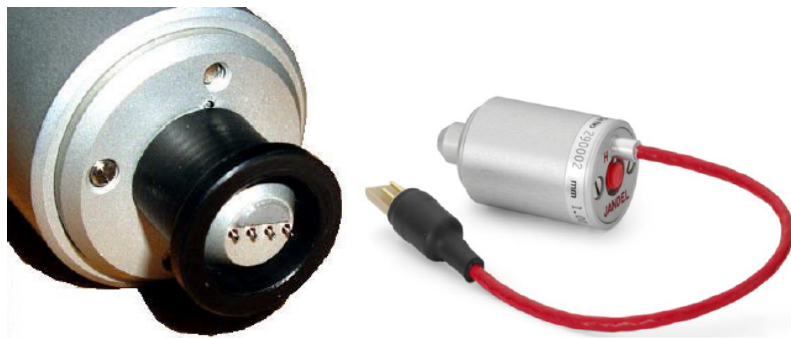


Figura 3.3: Fotografia do Dispositivo Jandel CYL-RM3000 Four Point Probe System comercializado pelo Bridge Technology [13].



Figura 3.4: Fotografia do kit *Temperature dependence of different resistors and diodes* comercializado pelo PHYWE [17].

METODOLOGIA E SISTEMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentadas as escolhas feitas na construção do sistema. O sistema é constituído por uma célula térmica, placa de aquisição PicoLog ADC-24 e uma plataforma LabVIEW, todos conectados como demonstra a Figura 4.1.

4.1 Metodologia Global da Experiência

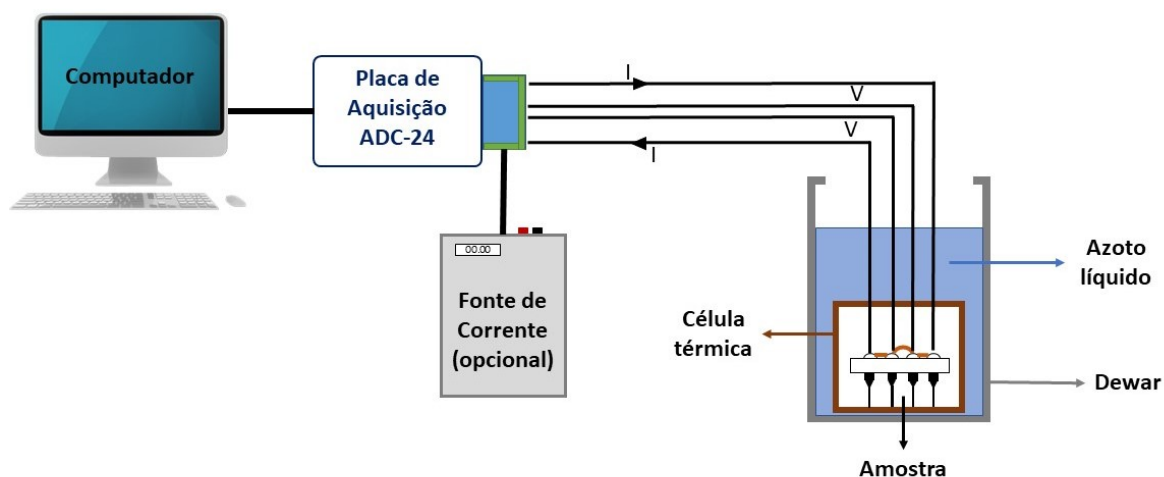


Figura 4.1: Esquema do sistema montado neste trabalho.

Esta montagem foi construída visando a sua utilização pelos estudantes nas aulas práticas da Unidade Curricular de Física do Estado Sólido. No esquema 4.1 está representado o sistema cujo principal objetivo é adquirir valores de tensão aos terminais das

amostras metálicas. Através dos dados das tensões adquiridos e da Lei de Ohm, expressa na equação 4.1, é calculada a resistência de cada amostra metálica.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (4.1)$$

Nesta equação R representa a resistência da amostra metálica, ΔV a tensão medida aos terminais da amostra e I a corrente que atravessa esta amostra.

Para calcular a resistividade das amostras metálicas, é utilizada a equação 4.2 pois é conhecida a resistência, calculada pela expressão anterior, e as características geométricas das amostras metálicas.

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (4.2)$$

Sendo a resistividade representada por ρ , a secção da amostra por S e o comprimento da amostra por L .

Para que seja possível calcular a resistividade das amostras, é necessário efetuar o procedimento experimental, que consiste em dois passos importantes:

1. Montagem das Amostras: os estudantes irão medir as dimensões e colar sobre o conector porta-amostras os fios metálicos que posteriormente serão usados como amostras no nosso sistema;
2. Arrefecimento das Amostras: os estudantes deverão montar todo o sistema como apresentado na Figura 4.1; iniciar a plataforma desenhada em LabVIEW e, após este já estar a adquirir dados, verter azoto líquido para dentro do *dewar* de forma a arrefecer a célula térmica. O azoto líquido irá evaporar naturalmente e a temperatura subirá lentamente. Serão registados as diferenças de potencial das amostras e a correntes que atravessam os diferentes circuitos, o que permitirá calcularmos $R(T)$. O estudante observa todo o processo através da plataforma LabVIEW e, quando atingida a temperatura ambiente, termina a aquisição e analisa os resultados obtidos.

Uma primeira versão do protocolo da atividade experimental, onde é explicado o procedimento completo que deverá ser realizado, pode ser consultado no Apêndice A.

4.2 Medição da Resistência pelo Método dos Quatro pontos

O método de medida de resistência utilizado neste trabalho será o Método de Quatro Pontos [22]. Este método, como o próprio nome indica, utiliza quatro pontos de contacto com a amostra metálica, dois dos contactos para permitir a passagem da corrente na amostra e dois contactos para medir a tensão. A separação dos contactos relativos à corrente e dos contactos relativos à tensão elimina a resistência de contacto entre os fios de medida e da amostra (colados ou soldados) como mostra a Figura 4.2.

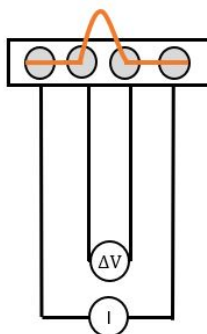


Figura 4.2: Ilustração de uma medição pelo método de quatro pontos.

4.3 Medição da Temperatura

No esquema da Figura 4.3 está esquematizado o circuito que permite medir as tensões aos terminais da Platina $100\ \Omega$ (Pt-100), que será utilizada como termómetro. Existe uma resistência de $100,37\ \Omega$ que está soldada entre os canais 1 e 2, permitindo que seja calculada a corrente que atravessa a Pt-100 através da Lei de Ohm. A corrente fornecida a este circuito tem como fonte a entrada de $+5\text{ V}$ da placa de aquisição.

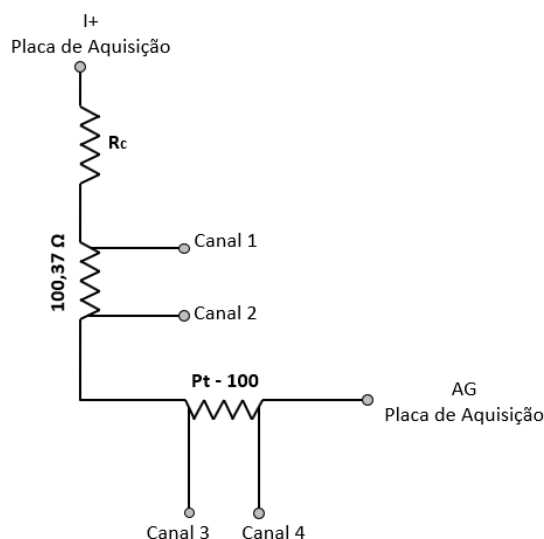


Figura 4.3: Esquema do sistema utilizado para medir a resistência da Pt-100 utilizada como termómetro.

Este sistema permite medir a temperatura no interior da célula térmica em tempo real, pois utiliza um termómetro resistivo de Pt-100. A Pt-100 tem uma resistência de $100\ \Omega$ a uma temperatura de $T=273,15\text{ K}$ e, como o comportamento da sua resistência é conhecido com a variação da temperatura, através da Equação 5.1, que é conhecida, é possível correlacionar estas duas grandezas.

$$T = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B\left(1 - \frac{R}{100}\right)}}{2B} + 273,15 \quad (4.3)$$

Onde T é a temperatura em Kelvin, A é a constante de valor $3,9083 \times 10^{-3}$, B é a constante de valor $-5,775 \times 10^{-7}$ e R é a resistência da Pt-100 [23].

4.4 Organização e Funcionamento do Sistema

Quando é efetuada uma medição estão a ser utilizados dois circuitos diferentes, correspondentes ao circuito da Figura 4.3 e ao da Figura 4.4 ou Figura 4.5, dependendo da fonte de corrente utilizada.

Os esquemas explanados na Figura 4.4 e 4.5 explicitam o circuito onde são medidas as diferenças de potencial aos terminais das amostras. Estes dois circuitos são similares e têm o mesmo propósito, medir as diferenças de potencial aos terminais das amostras metálicas, diferindo apenas na fonte de corrente utilizada, resistência de carga (R_c) e resistência *shunt*, que pretende ajustar o valor de corrente ao suportado pelo sistema. Podemos, ainda, observar que ambos os circuitos têm dois canais da placa de aquisição PicoLog ADC-24 conectados aos terminais de cada amostra. Estes canais irão funcionar em modo diferencial como será posteriormente explicado.

Na Figura 4.4 verificamos que o circuito tem na sua composição uma resistência *shunt* de $100,71 \Omega$, que esta é utilizada para calcular a corrente que passa através das amostras metálicas, corrente esta fornecida pela saída de $+5V$ da placa de aquisição (corrente de fonte interna). Este circuito é utilizado quando as amostras metálicas utilizadas na medição têm resistências altas e, por sua vez, as diferenças de potenciais aos seus terminais são perceptíveis quando atravessadas por uma corrente inferior a 1 mA .

Quando as resistividades são mais pequenas e as diferenças de potencial entre os terminais das amostras são muito baixa, será necessária uma corrente superior a 1 mA para que as diferenças de potencial sejam detetáveis pela placa de aquisição e, portanto, será necessário utilizar uma fonte de corrente externa, tal como esquematizado na Figura 4.5. Para que esta corrente fornecida pela fonte externa possa ser medida, este circuito tem uma resistência de *shunt* de $50,158 \Omega$, através da qual, a partir da sua diferença de potencial, é calculada a corrente.

Os circuitos utilizados na medição das diferenças de potencial nas amostras e na Pt-100 utilizada como termómetro são circuitos em série, por esse motivo, em qualquer ponto do sistema verifica-se a mesma corrente. Assim, o método dos quatro pontos é aplicado, medindo a corrente através das resistências *shunt*, como demonstrado nas figuras dos circuitos, que será a corrente que atravessa todo o circuito, e a tensão é medida aos terminais da amostras metálicas, através de dois contactos, como pode ser verificado nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5.

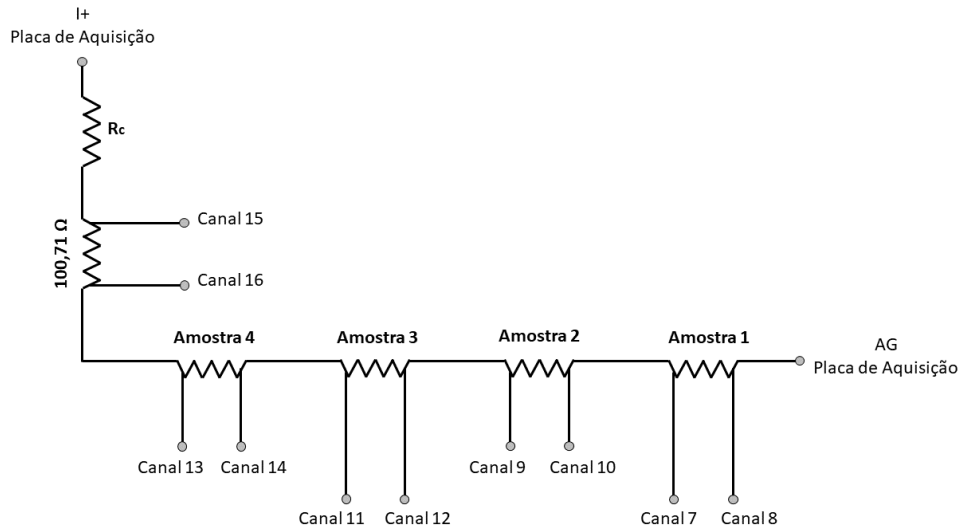


Figura 4.4: Esquema do sistema quando a corrente é produzida pela Placa de Aquisição PicoLog ADC-24.

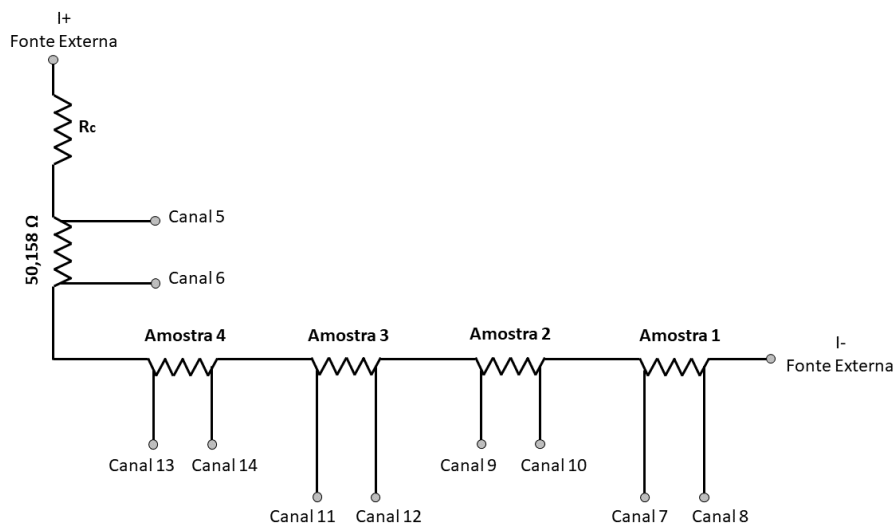


Figura 4.5: Esquema do sistema quando a corrente é produzida por uma fonte externa.

4.5 Funcionamento e implementação da Placa de Aquisição PicoLog ADC-24

A placa de aquisição PicoLog ADC-24 [24], cujas características podem ser consultadas no Anexo I, tem 24 bits de resolução e várias escalas ($0 \pm 39\text{ mV}$, até $0 \pm 2,5\text{ V}$) que permitem medir a tensão com precisão sobre uma grande gama, o que torna esta placa bastante versátil. Este é um dos principais motivos para a utilização desta placa de aquisição nesta montagem didática, pois algumas das amostras metálicas têm resistências muito pequenas (por vezes abaixo de $0,01\ \Omega$) e, conseqüentemente, as tensões que iremos medir são

bastante baixas sendo necessário utilizar muitas vezes a escala de 0 ± 39 mV. Esta placa tem oito entradas diferenciais que têm uma excelente rejeição do ruído, sendo este outro grande motivo da escolha desta placa, pois é necessário pelo menos um canal diferencial para a medição das tensão aos terminais de cada amostra. Estes canais diferenciais também podem ser utilizados como duas portas de entradas simples, tornando esta placa a mais versátil e adequada às necessidades deste projeto. O modelo ADC-24 conta ainda com quatro canais de entrada/saída configuráveis e não é necessário uma fonte de alimentação externa, sendo a energia necessária fornecida pelo computador ligado ao sistema.

A corrente fornecida às amostras e à Pt-100 podem ser internas, ou seja, utilizar saídas de +5V e -5V da placa de aquisição para gerar correntes necessárias para as medidas, ou podem ser externas, através de uma fonte de corrente externa.

A placa tem um software, PicoLog, que permite adquirir dados e, caso seja do interesse do utilizador, manipular e analisar os mesmos. No entanto, a comunicação entre a placa de aquisição e o computador irá ser realizada através de um programa e interface realizados em LabVIEW, apresentado na secção seguinte.



Figura 4.6: Fotografias: a) Placa de aquisição PicoLog ADC-24 e b) Placa que permite a ligação dos fios de medida ao ADC-24. [24].

Devido à limitação de corrente da saída de +5 V, saída escolhida para fornecer a corrente interna, foram soldadas resistências de carga à placa ilustrada na Figura 4.6b, de forma a reduzir a corrente abaixo das 2 mA permitidos pela saída. Para além destas duas resistências, foram soldadas mais três resistências de shunt, para que pudesse ser medido o valor da corrente que atravessa cada um dos circuitos, tal como explicado no primeira secção deste capítulo.

Na Figura 4.7 podemos ver uma fotografia onde podemos localizar os canais utilizados para medir a corrente e a localização das resistências soldadas. Na Tabela 4.1 estão apresentados os valores das resistências utilizadas.

Em conclusão, esta placa de aquisição permite-nos utilizar um sistema de aquisição de dados multi-canal com uma precisão necessária para este trabalho e centraliza toda a parte de eletrónica (fonte de corrente e medição de tensão).

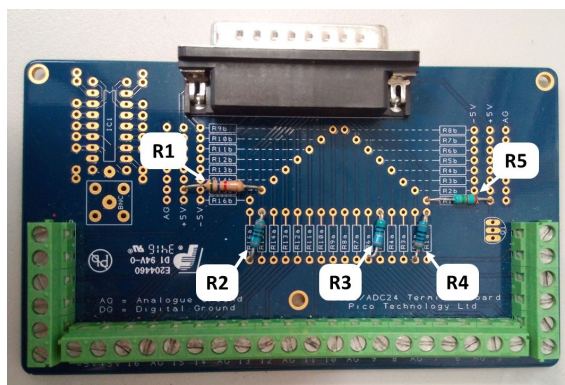


Figura 4.7: Fotografia da placa de ligação com a placa de aquisição ADC-24 com identificação das resistências soldadas.

Tabela 4.1: Correspondência entre as resistências, os seus terminais e valores.

Resistência	Função	Terminais	Valor
R1	Resistência de Carga	+5 V e Canal 15	5,6 k Ω , \pm 5%
R2	Resistência de Shunt	Canal 15 e Canal 16	100,71 Ω , \pm 5%
R3	Resistência de Shunt	Canal 5 e Canal 6	50,158 Ω , \pm 10%
R4	Resistência de Shunt	Canal 1 e Canal 2	100,37 Ω , \pm 5%
R5	Resistência de Carga	+5 V e Canal 1	8,5 K Ω , \pm 5%

4.6 Peças e Ligações do Sistema Criogénico

A célula térmica utilizada na montagem foi desenhada especificamente para este sistema, tentando evitar os inconvenientes da célula térmica desenvolvida pelo João Wemans [9], para sistema criogénico já mencionado anteriormente.

A nossa célula é constituída por cinco peças desenhadas e construídas especificamente para este projeto, cujos desenhos completos se encontram no Apêndice B. Para completar a célula térmica foi necessário utilizar um tubo de acrílico cortado com a medida pretendida e um adaptador deste tudo ao conector DB25.

A escolha de projetar cinco peças separadas em vez de uma peça única deve-se, principalmente, à ambição de ter uma célula com uma grande diversidade de utilizações. Assim, é possível alterar a célula e a sua finalidade apenas modificando uma das peças, podendo adaptar esta célula a um sistema ou amostras totalmente diferentes, tornando a célula mais versátil e poupando recursos.

Na Figura 4.8a podemos observar as peças 1, 2 e 3 devidamente montadas. A *Peça 2* é a plataforma onde serão encaixados os conectores que serão utilizados como porta-amostras. Esta peça foi dimensionada de forma a poder encaixar quatro amostras e uma Pt-100 em simultâneo e tem ainda quatro furos que permitem às *Peças 3* serem devidamente aparafusadas, mantendo os conectores imóveis.

A *Peça 1* é o suporte da plataforma (*Peça 2*) e faz a ligação com a *Peça 5* e com o invólucro da célula (*Peça 4*). Tem quatro furos com helicoils, o que permite aparafusar a

Peça 4 à célula, ficando desta forma, bem segura e estável.

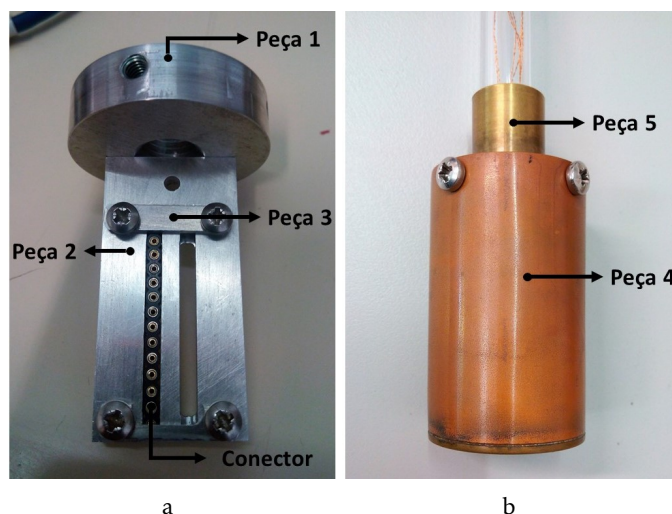


Figura 4.8: Conjunto de peças que formam a célula térmica: a) As peças 1, 2 e 3 montadas e b) As peças 4 e 5 montadas.

As dimensões desta célula térmica estão adaptadas ao protocolo experimental, por esse motivo foram projetadas de forma a célula poder ser colocada com grande facilidade dentro do *dewar* e de forma a evitar uma inércia térmica excessiva.

No entanto, foi necessário desenhar as peças fortalecendo algumas delas, tal como é o caso da *Peça 4* da qual foi desenhada apenas as paredes do invólucro e posteriormente foi soldada a tampa do invólucro de latão com uma maior espessura que as paredes da peça, ajudando na inércia térmica do invólucro da célula. Para que a nossa experiência seja bem sucedida, pretende-se que a temperatura dentro da célula térmica seja o mais homogênea possível e que varie de forma gradual.

Os conectores de 12 pinos imobilizados na *Peça 2*, onde serão colocadas as amostras como demonstrado na Figura 4.9b, têm fios de cobre soldados aos seus terminais como podemos observar na fotografia da Figura 4.9a. Os fios utilizados são de cobre, envernizados e têm cerca de 125 μm de diâmetro. São as ligações realizadas por estes fios que permitem estabelecer um contacto entre as amostras colocadas nos pinos e o conector DB 25, que posteriormente irá realizar ligação com a placa de aquisição.

A célula tem ainda uma quinta peça que faz a conexão entre a *Peça 1* e o tubo de acrílico, como demonstrado na Figura 4.8b. O tubo de acrílico protege os fios que fazem a ligação entre as amostras e o conector. Este fio tem cerca de 40 cm, comprimento suficiente para que o conector esteja devidamente distanciado do *dewar* e, consequentemente, do azoto líquido.

Na Figura 4.10 podemos ver como os conectores estão ligados aos diferentes canais da placa de aquisição ADC-24. Nesta figura podemos verificar que os contactos entre os diferentes pinos e com a placa de aquisição foram realizados de forma a que cada amostra

pudesse ter os quatro pontos de contacto independentes necessários, como explicado na secção 4.2.

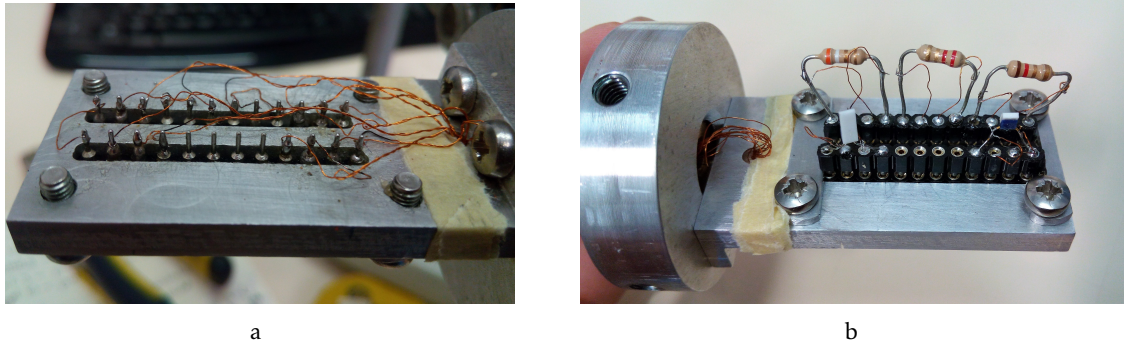


Figura 4.9: Fotografias da célula térmica: a) Fotografia das ligações entre os fios de cobre e o conector imobilizado na *peça 2* e b) Fotografia do sistema com os porta-amostras encaixados nos conectores

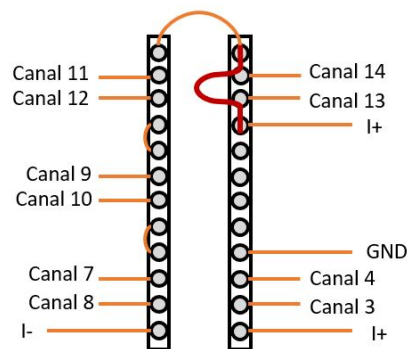


Figura 4.10: Esquema ilustrativo das ligações efetuadas ao conector imobilizado na *Peça 2*. A linha vermelho esquematiza uma amostra montada.

Os materiais utilizados para construir esta célula encontram-se na tabela 4.2 e estes foram escolhidos de acordo com a matéria prima disponível e tendo em conta as condutividades térmicas dos diferentes materiais, pelas razões supracitadas.

Tabela 4.2: Materiais utilizados para construir as peças que compõem a montagem didáctica.

Peça	Materiais
1	Alumínio
2	Alumínio
3	Alumínio
4	Cobre
5	Latão
Tampa da peça 5	Latão
Tubo e adaptador	Acrílico

4.7 Preparação das Amostras

Os fios metálicos utilizados como amostras nas medições com esta montagem didática são amostras de alumínio (Al), chumbo (Pb), ouro (Au), cobre (Cu) e platina 100 Ω (Pt-100) com diâmetros compreendidos entre 20 μm e 250 μm .

Estas amostras são coladas ou soldadas a um conector que, por sua vez, estará encaixado no conector preso na *Peça 2*

Devido à finalidade deste sistema e ao facto de, futuramente, ser utilizado por estudantes que poderão não estar familiarizados com a fragilidade dos fios metálicos nem com as dimensões utilizadas, foram utilizados conectores como suporte das nossas amostras, conforme pode ser observado na Figura 4.11. Estes conectores são facilmente removíveis do sistema, sendo simples trocar uma amostra caso seja o pretendido e, após serem colados ou soldados a estes conectores, as amostras ficam mais seguras e menos suscetíveis a descuidos das pessoas que as manuseiam.

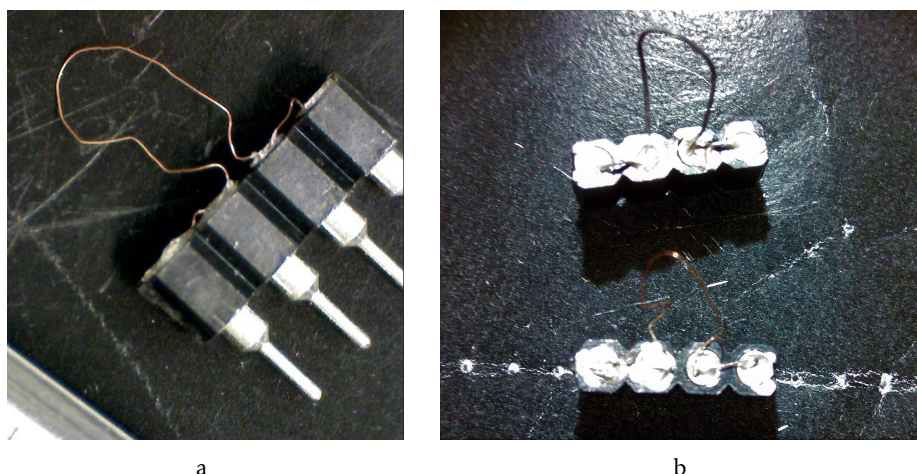


Figura 4.11: Fotografia de fios metálicos Cobre e Chumbo colados nos conectores com cola condutora: a) Amostra de Cobre com 76 μm de diâmetro e b) Amostra de Cobre com 76 μm de diâmetro e Chumbo com 250 μm de diâmetro

Para que as medidas de tensão obtidas não tenham em conta a resistência de contacto, é utilizado o método de quatro pontos, como já anteriormente referido. Isto quer dizer que cada amostra será colada num conector com quatro contactos que serão os pontos de contacto elétrico com a amostra, como mostrado na Figura 4.12.

A conexão dos fios metálicos com o conector é realizada por soldadura ou através de uma cola condutora. Esta última opção é a mais adequada pois não implica aquecer a amostra ou o conector, evitando possíveis danos aos mesmos. Para além disso, existem muitos constrangimentos à soldadura das amostras, tais como o alumínio não poder ser soldado, o chumbo poder derreter durante a soldadura e ser muito complicado manusear as amostras com um diâmetro abaixo dos 150 μm .

A cola condutora utilizada na realização das amostras para esta experiência foi a RS

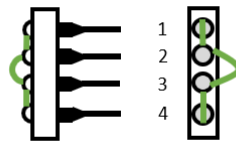


Figura 4.12: Esquema ilustrativo da montagem das amostras.

Pro Conductive Paint. Existem alguns cuidados que é necessário ter quando utilizada esta cola condutora para realizar amostras, por exemplo: esperar quinze minutos entre cada contacto, pois a cola necessita de secar antes do fio metálico poder ser movimentado novamente; após todos os contactos colados, a amostra deverá ficar imóvel durante cerca de uma hora, de forma que todos os contactos fiquem devidamente secos antes de entrarem em contacto com o Azoto líquido; não permitir que a cola de um contacto toque na cola do contacto seguinte, pois irá provocar um curto-circuito, reduzindo os pontos de contacto a três e modificando o esquema da aquisição das tensões aos terminais das amostras.

4.8 Programa da plataforma LabVIEW

O LabVIEW é um software de linguagem de programação gráfica que permite realizar o controle e análise de dados, utilizado especialmente em projetos de engenharia. Este software foi escolhido para este projeto exatamente por poder realizar a comunicação com a placa de aquisição PicoLog ADC-24, permitir a análise dos dados adquiridos, a gravação dos dados adquiridos com segurança e a criação de uma plataforma onde estes dados podem ser visualizados em tempo real.

Para realizar a comunicação com a placa de aquisição foi utilizado um *package* fornecido pela Pico Technology, empresa que comercializa a placa de aquisição utilizada. A placa de aquisição comunica com o programa através de comandos disponibilizados por este *package*, fornecendo várias comandos e informações, assim como os dados relativos à diferença de potencial medida aos terminais das amostras.

A plataforma gerada pelo programa apresentada na Figura 4.13 tem dois LED, um vermelho, que permite perceber se o programa e a placa de aquisição estão em comunicação, e outro verde, que permite visualizar se os dados estão a ser guardados numa folha EXCEL. A gravação dos dados numa folha de EXCEL é a primeira opção que podemos tomar assim que começamos a correr o programa. Depois apresenta há quanto tempo a medição está a decorrer (em segundos), a temperatura da célula térmica em Kelvin (calculada através da Pt-100), a corrente que atravessa a Pt-100 e a corrente que atravessa as amostras. Estas informações são essenciais para o controlo imediato da medição, podendo controlar se a corrente atravessa as amostras e o termómetro, se a temperatura está a evoluir da forma prevista ou se existe algum curto-circuito na montagem.

As tensões medidas, assim como a resistência e a resistividade das amostras são apresentados na primeira aba do lado direito do programa. Esta é a secção mais importante da nossa plataforma, pois permite ao utilizador perceber se as medições são as esperadas, percebendo se o sistema está a funcionar como deveria.

É possível ainda ver quatro gráficos diferentes: das tensões medidas em função do tempo; da temperatura da célula em função do tempo; da resistividade das amostras em função do tempo e da resistividade das amostras em função da temperatura. Estes gráficos permitem ter uma avaliação geral das medições efetuadas até o momento. Visto a evaporação do azoto líquido e aquecimento da célula térmica até a temperatura ambiente serem processos relativamente demorados, é importante que o utilizador possa ver a evolução dos mesmos sem acompanhar todos os passos do processo.

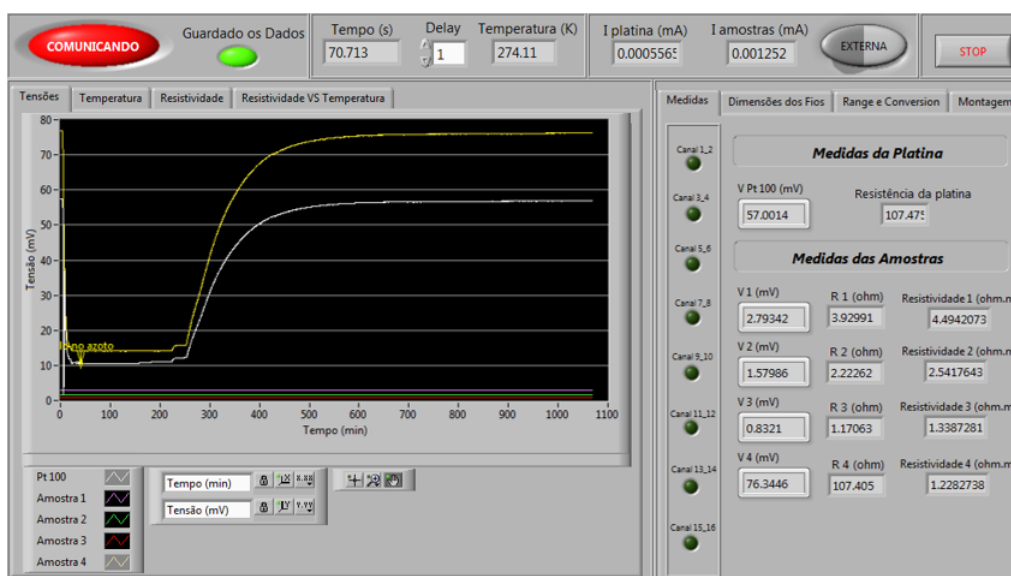


Figura 4.13: Printscreen do plataforma LabVIEW em utilização.

Para que a aquisição seja o mais precisa e funcional possível, a plataforma programada para este fim tem algumas opções que adaptam o melhor possível a aquisição de dados às características da amostra analisada. Assim, é possível alterar na própria plataforma do programa se será utilizada uma fonte corrente externa ou uma fonte corrente interna, a escala de tensão utilizada para cada canal diferencial (sendo visível através de LED se a tensão recebida ultrapassa esta escala), alterar o tempo de conversão para cada canal, indicar as dimensões de cada amostra, para que seja possível visualizar a resistividade das amostras em tempo real e alterar o *delay* com que os dados são analisados. Podemos verificar as opções disponibilizadas para a alteração das dimensões das amostras na Figura 4.14 e na Figura 4.15 podemos ver as opções disponibilizadas para a alteração da escalas de cada canal, assim como o tempo de conversão.

No início o utilizador pode criar uma folha EXCEL com os dados, como já mencionado. Esta folha é atualizada após cada medição e são gravados os dados das medições. Para evitar ficheiros demasiados grandes, estes dados poderão não ser gravados se os valores

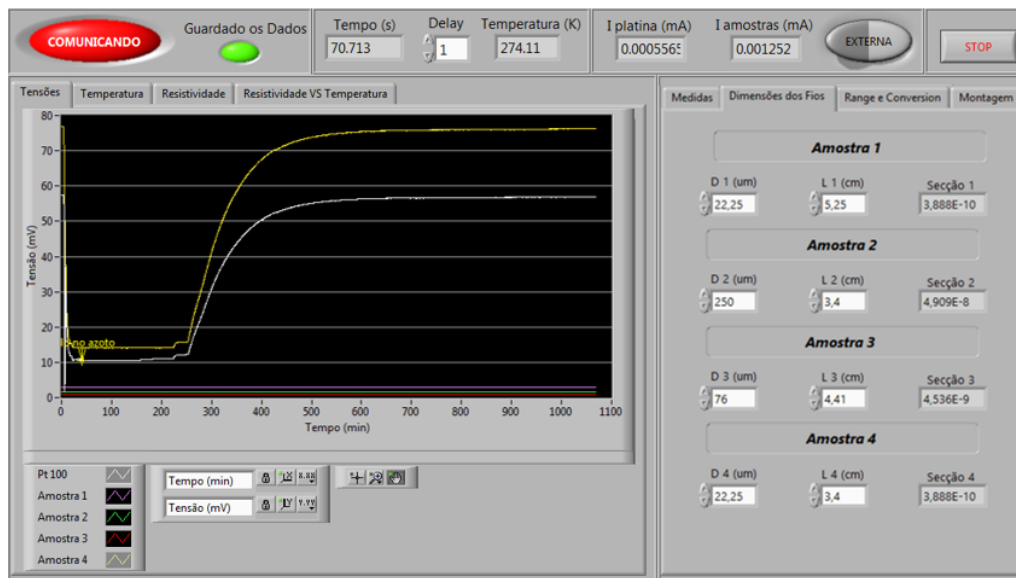


Figura 4.14: Printscreen plataforma LabVIEW que permite visualização da aba de dimensões das amostras.

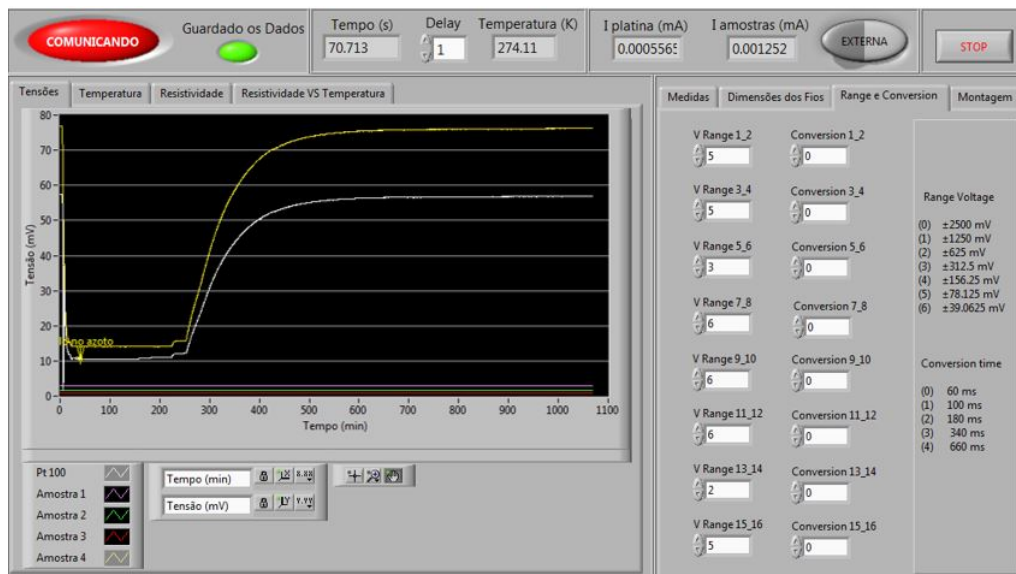


Figura 4.15: Printscreen plataforma LabVIEW que permite visualização da aba da escala de tensões e conversões de tempo.

obtidos para a temperatura ou das tensões das amostras não variarem 5% dos valores da última medição, basta uma das amostras ou a temperatura ter uma variação superior a 5% e todos os dados serão gravados. Se passarem 60 minutos e nenhum dado alterar o seu valor, então o valor dos dados serão também gravados. Estas medidas são essenciais para que o ficheiro tenha apenas dados úteis, pois, neste trabalho, o grande interesse é analisar a variação das resistividades com a temperatura e, por esse motivo, quando estas estão estáveis, não são importantes para esta análise.

O ficheiro que será adquirido do programa tem o cabeçalho apresentado na Figura

4.16, apresenta os dados da diferença de potencial aos terminais de cada amostra, assim como aos terminais da Pt-100 e das resistências utilizadas para calcular as correntes. Apresenta também o valor das correntes que atravessam a Pt-100 e as amostras e a temperatura da célula térmica. A correspondência com cada elemento do cabeçalho encontra-se na Tabela 4.3.

Tempo (s)	I Pt 100 (mA)	I amostras (mA)	Temp. Pt (K)	Rc Pt (mV)	Pt 100 (mV)	Rc Ext_Amostras (mV)	Amostra 1 (mV)	Amostra 2 (mV)	Amostra 3 (mV)	Amostra 4 (mV)	Rc Int_Amostras (mV)
0	0,606841	6,230312	30,977	60,908653	66,516687	312,5	28,23376	0,11785	1,73124	625	0,13981
20,911196	0,607116	10,52671	298,011522	60,936266	66,571039	527,998719	28,244903	0,117836	1,731422	625	0,140462
26,063491	0,606963	10,526003	298,11431	60,920844	66,569223	527,963254	28,248172	0,116196	1,734947	1122,803375	0,140183
86,227932	0,607039	10,526774	298,377772	60,928536	66,597097	528,001923	28,251995	0,117896	1,734193	1124,731287	0,139996
146,359371	0,607035	10,527214	298,454511	60,928099	66,611775	528,023976	28,245313	0,119032	1,731795	1124,880746	0,139987
206,496811	0,607154	10,527069	298,088332	60,940029	66,56289	528,016749	28,240093	0,118245	1,731832	1124,7444	0,140024
266,653252	0,607097	10,52711	298,165764	60,934376	66,628259	528,018761	28,239594	0,117975	1,73274	1124,610737	0,14022
275,803775	0,607127	10,526832	298,315715	60,937365	66,611765	528,004828	27,342041	0,115922	1,642509	1121,625587	0,140024

Figura 4.16: Cabeçalho do ficheiro criado pela plataforma LabVIEW.

Tabela 4.3: Correspondência entre os títulos do cabeçalho do ficheiro gerado pelo LabVIEW e o seu significado.

Cabeçalho	Significado
I Pt100 (mA)	Corrente que percorre a Pt-100 utilizada como termóstato
I amostras (mA)	Corrente que percorre as amostras
Temp. Pt (K)	Temperatura calculada através da Pt-100
Rc Ext_Amostras (mV)	Tensão aos terminais da Resistência de Shunt (fonte de corrente externa)
Amostra x (mV)	Tensões aos terminais da amostra x
Rc Innt_Amostras (mV)	Tensão aos terminais da Resistência qde Shunt (fonte de corrente interna)

4.9 Montagem Didática completa

Nas fotografias da Figura 4.17 está representado todo o nosso sistema criogénico. Na fotografia da Figura 4.17a podemos observar a célula térmica constituída pelas cinco peças desenhadas para o efeito e ainda um tudo de acrílico, um suporte para o conector e um conector DB 25.

Na fotografia da Figura 4.17b podemos observar todo o sistema exterior. Nesta foto é possível visualizar o *dewar* onde é colocada a célula térmica durante as medições e para onde é vertido o azoto líquido utilizado para arrefecer a célula térmica, a placa de aquisição PicoLog ADC-24 que está conectada com a nossa célula térmica e com o computador e a fonte de corrente externa, elemento opcional na montagem, que está conectada à placa de aquisição.

Todos estes elementos referidos nas secções deste capítulo e representados nas imagens referidas culminam na Montagem Didática que permite medir a resistividade de amostras metálicas numa gama de temperaturas que varia entre os 77 K e os 300 K.

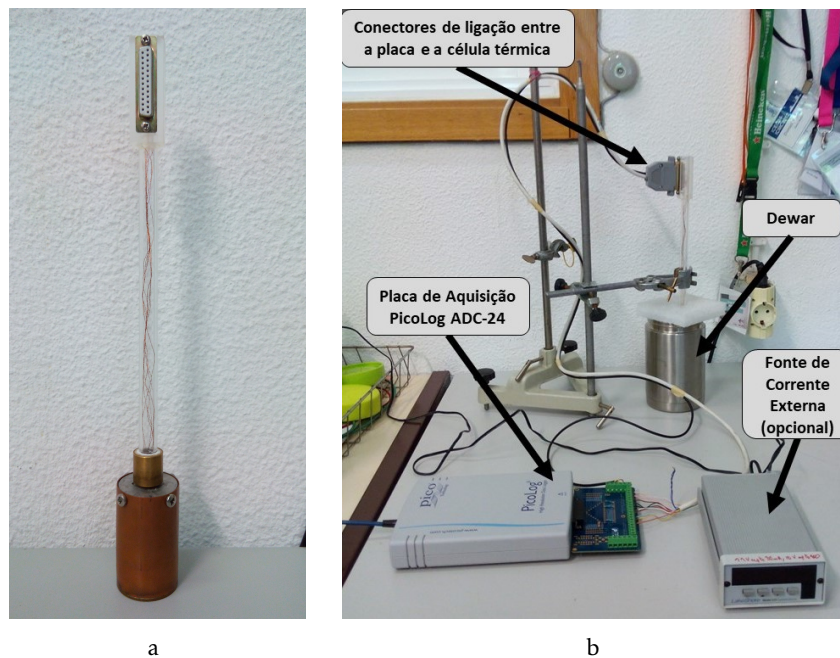


Figura 4.17: Fotografias da montagem didática completa: a) Célula térmica montada e b) Sistema de arrefecimento das amostras completamente montado

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo tem como predominante objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos através da montagem didática que é descrita no capítulo anterior.

Foram efetuados várias medições com este sistema, mas serão apresentados neste capítulo dados de apenas duas medições. A *medição A* foi realizada no dia 24 de maio e junta amostras de alumínio, cobre, ouro e platina e as características destas amostras são apresentados na Tabela 5.1. A fonte de corrente utilizada é a da placa de aquisição PicoLog ADC-24.

A *medição B* foi efetuada no dia 25 de julho com amostras de cobre, chumbo, ouro e platina e as características destas medições são apresentados na Tabela 5.2. Nesta medição foi utilizada uma fonte de corrente externa de 10 mA.

Através da Tabela 5.2 podemos perceber que as dimensões do chumbo apresentam um diâmetro superior ao das outras amostras. Isto deve-se ao facto da resistência mecânica da amostra de chumbo ser muito reduzida e, por esse motivo, ser necessário ter uma amostra de diâmetro maior para evitar a quebra da amostra durante a sua manipulação.

Tabela 5.1: Dimensões das amostras da *medição A* realizada no dia 24 de maio de 2018 com fonte de corrente interna

Amostra	Comprimento (cm)	Diâmetro (μm)	Secção (m^2)
Alumínio (Al)	1,5	30	$7,07 \times 10^{-10}$
Cobre (Cu)	5,5	119	$1,11 \times 10^{-8}$
Ouro (Au)	5,5	22,25	$3,89 \times 10^{-10}$

Tabela 5.2: Dimensões das amostras da *medição B* realizada no dia 25 de julho de 2018 com fonte de corrente externa

Amostra	Largura (cm)	Diâmetro (μm)	Secção (m^2)
Cobre (Cu)	4,41	76	$4,54 \times 10^{-9}$
Chumbo (Pb)	0,25	250	$4,91 \times 10^{-8}$
Ouro (Au)	5,25	22,3	$3,91 \times 10^{-10}$

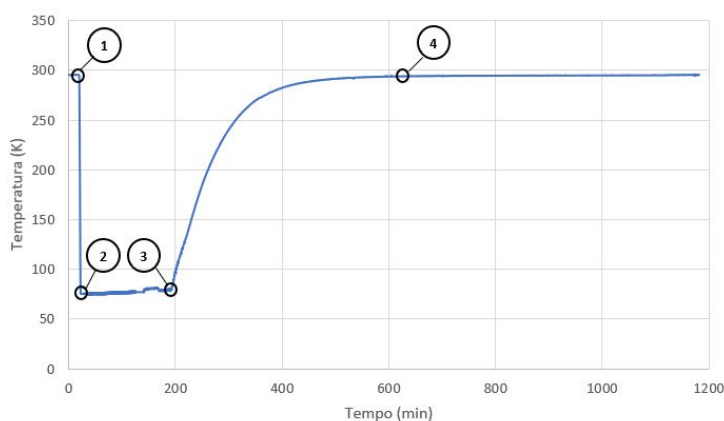
5.1 Variação da Temperatura

A variação da temperatura é o ponto fulcral deste trabalho, por esse motivo, é essencial monitorizá-la. No gráfico presente na Figura 5.1 podemos observar a variação da temperatura no interior da célula térmica na *medição B*.

Neste gráfico podemos observar três zonas onde a temperatura se mantém relativamente estável e duas grandes variações de temperatura, uma do ponto 1 ao ponto 2, em que a temperatura desce da temperatura ambiente, onde estava estabilizada, para a temperatura do azoto líquido. Esta descida acontece porque é vertido azoto líquido para dentro do *dewar* onde se encontra a célula térmica, até a mesma estar completamente submersa. Consequentemente, a temperatura da célula diminui até chegar aos 77 K.

A segunda grande variação de temperatura ocorre entre o ponto 3, onde a célula se encontra estável na temperatura do azoto líquido, e o ponto 4, novamente à temperatura ambiente. Esta variação mais lenta deve-se ao aquecimento da célula após todo o azoto líquido estar completamente evaporado. O *dewar* é um bom isolador e, por esse motivo, a célula térmica que está no seu interior tem um aquecimento lento. O material e design das peças que constituem a célula térmica também ajudam neste isolamento e, por consequência, no aquecimento gradual da temperatura do interior da célula.

Para as curvas de $R(T)$, apenas foi contabilizada a variação entre o ponto 2 e o ponto 4 pois é mais lenta e tem mais medições. Este aquecimento é um processo muito lento, demorando cerca de 5h30 para que a temperatura aqueça até a temperatura ambiente.

Figura 5.1: Variação da Temperatura na *medição B*.

5.1.1 Teste com cinco platinas

De forma a verificar a homogeneidade da temperatura em todos os pontos da célula térmica e a diferença entre as resistências medidas por platinas 100 Ω (Pt-100) de diferentes classes, foi efetuado uma medição teste com estes objetivos.

Esta medição consistiu em repetir o processo realizado nas medições com as nossas amostras metálicas, mas substituindo-as por quatro Pt-100. Assim, foram analisadas as tensões aos terminais de cinco Pt-100 de diferentes classes. As Pt-100 utilizadas nesta medição estavam distribuídas, como demonstrado no esquema da Figura 5.2.

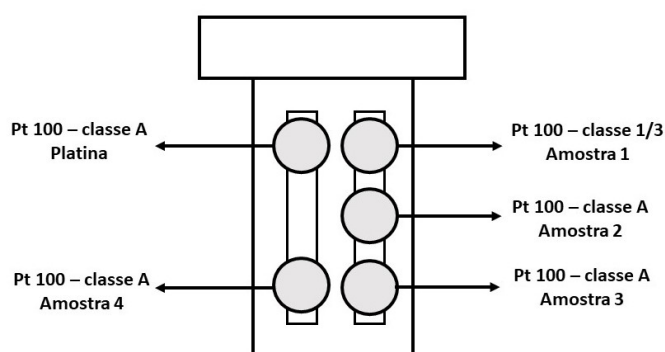


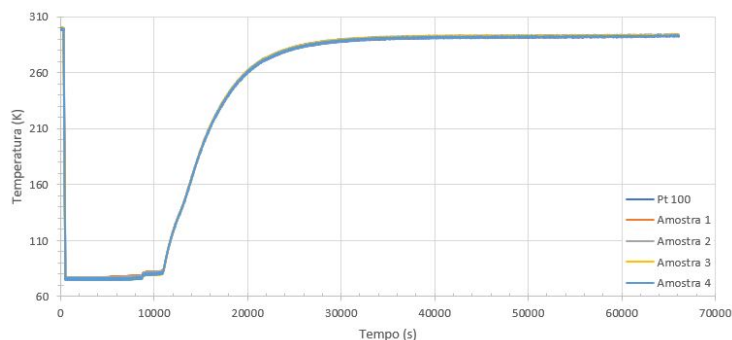
Figura 5.2: Esquema da montagem de cinco Pt-100 na célula térmica.

Os resultados desta medição estão representados nas Figuras 5.3, onde as temperaturas medidas pelas cinco platinas são comparadas.

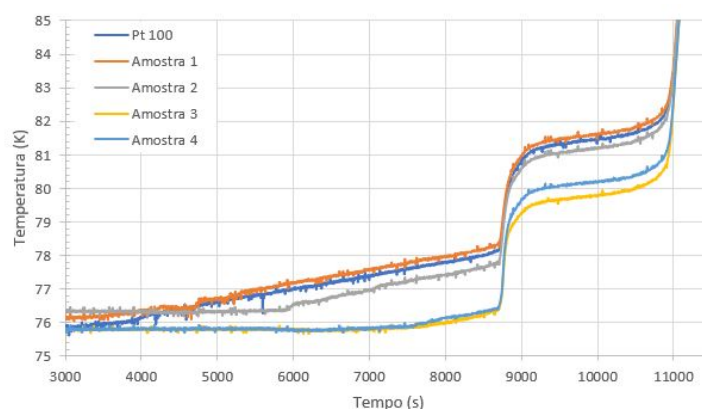
Na Figura 5.3a podemos observar a evolução da temperatura que é medida a partir de cada Pt-100, verificando que na grande maioria do tempo, existe concordância entre as temperaturas verificadas pelas Pt-100.

Na Figura 5.3b estão representadas as diferentes evoluções da temperatura das Pt-100 no começo do aquecimento da célula térmica, onde é possível perceber que existe algum desfasamento entre o aquecimento das diferentes Pt-100 devido às suas posições na célula térmica. Verificamos que as Pt-100 que estão na parte superior da célula térmica apresentam um aquecimento mais rápido, pois são as primeiras Pt-100 a deixar de estar imersas no azoto quando este evapora. Este comportamento verifica-se durante alguns segundos até todas as Pt-100 estarem em contacto com o ar e o seu aquecimento ser homogéneo. Apesar de existirem alguns segundos de desfasamento, este não é preponderante nos resultados finais da experiência.

Nos gráficos apresentados na Figura 5.4 podemos observar um exemplo do desvio entre a temperatura da Pt-100 localizada no local do termómetro, posição onde se encontra sempre a Pt-100 de referência para medição da temperatura, e a Pt-100 que está na posição da amostra 1. Verificamos que o desvio nunca ultrapassam 3,5 % e que a zona onde o desvio é superior é nas baixas temperaturas.



a



b

Figura 5.3: Evolução da temperatura medida através de cinco plantinas 100 Ω : a) evolução ao longo de todo o tempo de medição e b) evolução da temperatura no início do aquecimento da célula térmica.

Ao analisar os gráficos que se encontram nas Figuras 5.3 e 5.4 podemos, então, concluir que a temperatura nos diversos pontos da célula térmica, onde serão posicionadas as amostras, são praticamente iguais e que não é necessário utilizar uma Pt-100 de *classe 1/3* pois a Pt-100 *classe A* tem a precisão necessária para esta medição.

Após estas conclusões, podemos considerar o interior da célula térmica isotérmico, visto os diferentes pontos da célula terem apresentado a mesma variação de temperatura

5.2 Medição das Tensões

Ao analisarmos os gráficos da Figura 5.5 podemos perceber que as curvas das diferenças de potencial aos terminais das amostras de ouro, cobre, chumbo e platina 100 Ω reagem à variação de temperatura da célula térmica. Podemos, ainda, verificar que estas curvas das diferenças de potencial das amostras têm um comportamento muito similar ao da curva de temperatura espelhado na Figura 5.1, verificando que as diferenças de potencial, intrinsecamente relacionada com a resistividade, estão a variar da mesma forma que a temperatura.

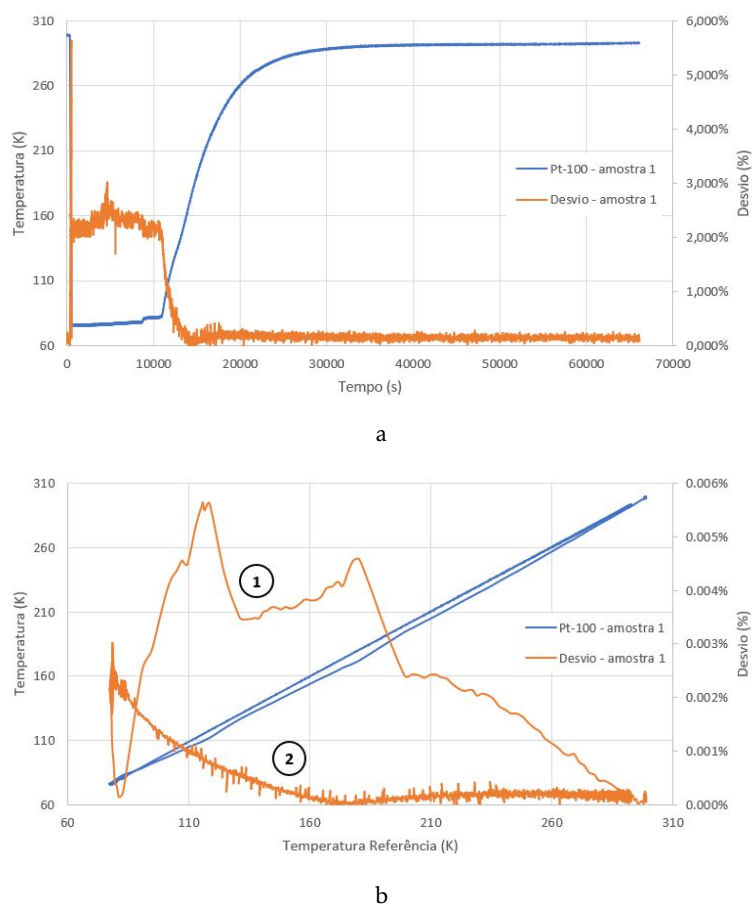


Figura 5.4: Gráfico dos resultados do teste realizado às cinco Pt-100 posicionadas na célula térmica: a) Pt-100 (classe 1/3) localizada na posição da amostra 1; b) Pt-100 (classe A) localizada na posição da amostra 2

Como podemos observar nos gráficos obtidos, existe uma grande diferença nos valores de tensão aos terminais das diferentes amostras e, por este motivo, é essencial adaptar as escalas a serem usadas pela placa de aquisição. Por exemplo, a amostra de chumbo tem uma baixa resistência devido às suas características geométricas e, por esse motivo, uma baixa diferença de potencial aos terminais é mais baixa sendo necessário utilizar a escala de tensões mais baixa ($\pm 39,0625$ mV).

5.3 Resistividade em Função da Temperatura

Através das características das amostras e do valor da resistência, facilmente calculado através dos dados fornecidos pela folha de EXCEL que obtemos após a medição, podemos calcular a resistividade de cada amostra e a sua variação com a temperatura. Para calcular a resistividade é utilizada a seguinte expressão:

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (5.1)$$

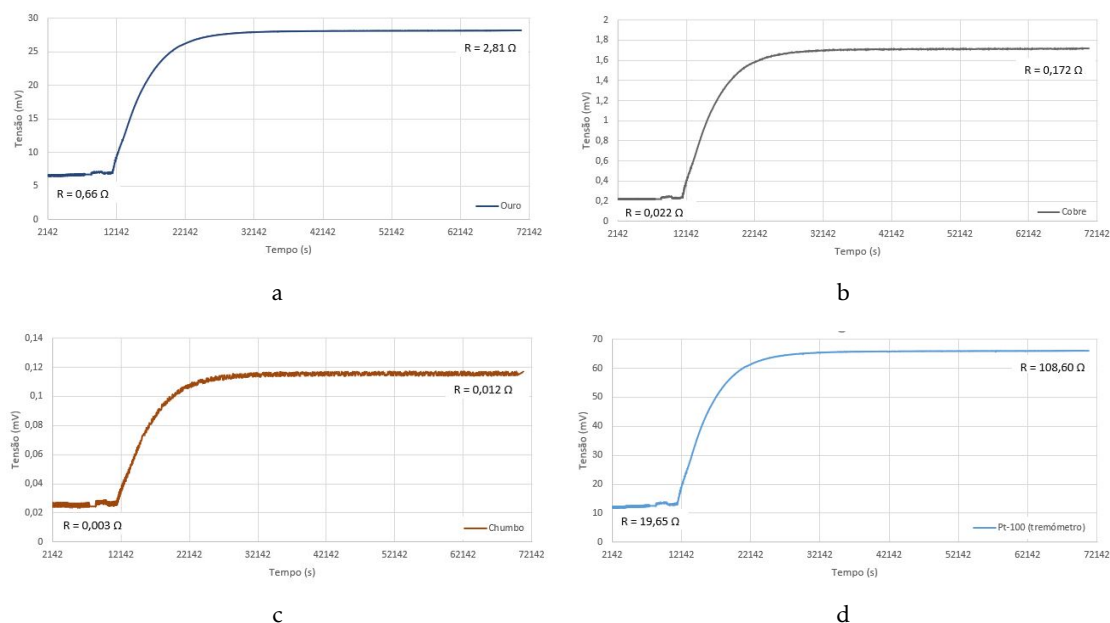


Figura 5.5: Evolução das tensões aos terminais das amostras metálicas durante o seu aquecimento referentes à *medição B* com uma corrente de 10 mA: a) Amostra de ouro; b) Amostra de cobre; c) Amostra de chumbo e d) Amostra de platina 100 Ω

Onde ρ representa a resistividade, R a resistência, S a secção do fio metálico e L o comprimento do fio metálico. A resistência será calculada através das diferenças de potencial das amostras e da corrente do circuito.

A partir desta expressão é calculada a resistividade em todos os pontos das medições e, assim, é possível efetuar gráficos de resistividade em função da temperatura.

Nos gráficos apresentados nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 é apresentada a relação da resistividade com a temperatura para as amostras da *medição A*, alumínio, ouro e cobre respetivamente, e a sua comparação com os valores tabelados de resistividade em função temperatura [25].

Podemos perceber que as curvas de resistividade em função da temperatura destas amostras varia ligeiramente da curva dos valores tabelados. Estas variações podem dever-se a erros na medições de tensões aos terminais das amostras, erros na placa de aquisição e na sua programação ou nas medições das características geométricas das mesmas. Estes possíveis erros serão discutidos na secção seguinte.

No entanto, é perceptível a semelhança entre as curvas e, conseqüentemente, podemos concluir que o comportamento dos metais segue a linha prevista.

5.3. RESISTIVIDADE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

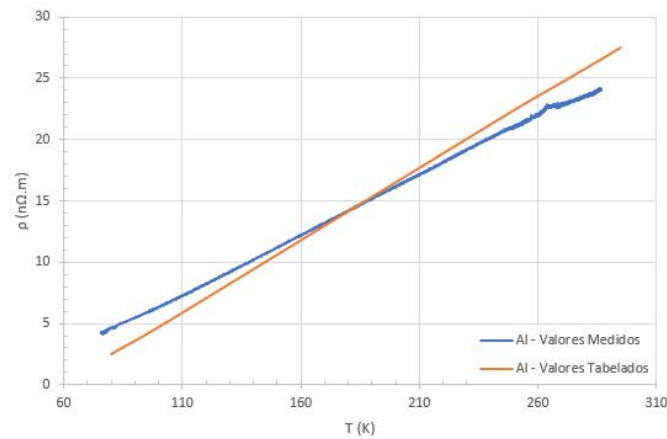


Figura 5.6: Comparação entre as curvas de resistividade em função da temperatura da amostra de alumínio da medição A e as curvas tabeladas [25]

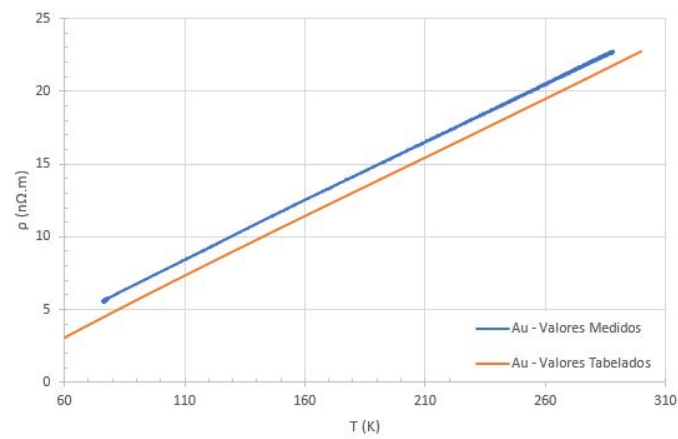


Figura 5.7: Comparação entre as curvas de resistividade em função da temperatura da amostra de ouro da medição A e as curvas tabeladas [25]

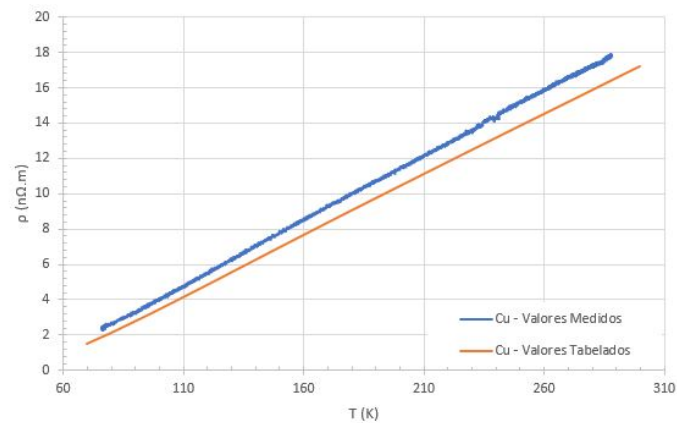


Figura 5.8: Comparação entre as curvas de resistividade em função da temperatura da amostra de cobre da medição A e as curvas tabeladas [25]

Podemos observar no gráfico das Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 as curva de resistividade em função da temperatura para as amostras de ouro, cobre e chumbo da *medição B*, respetivamente.

No gráfico da Figura 5.11 referente à amostra de chumbo podemos perceber que existe um maior ruído em comparação com os restantes medidas apresentados. Esta variação deve-se ao comprimento da amostra ser reduzido e a secção da amostra ser elevada, o que implica uma resistência pequena e, consequentemente, as tensões medidas aos terminais da amostra serão pequenas, como se pode verificar na Figura 5.5c. No entanto, apesar desta limitação, os valores medidos são bastante próximos dos valores tabelados.

Denota-se, novamente, que estas curvas não correspondem exatamente aos valores tabelados esperados. Mas no caso da *medição B* os valores estão mais próximos dos tabelados. Isto pode ser consequência de uma maior corrente a atravessar as amostras e, por sua vez, uma diferença de potencial aos terminais mais alta que mais facilmente pode ser observada e monitorizada pela placa de aquisição.

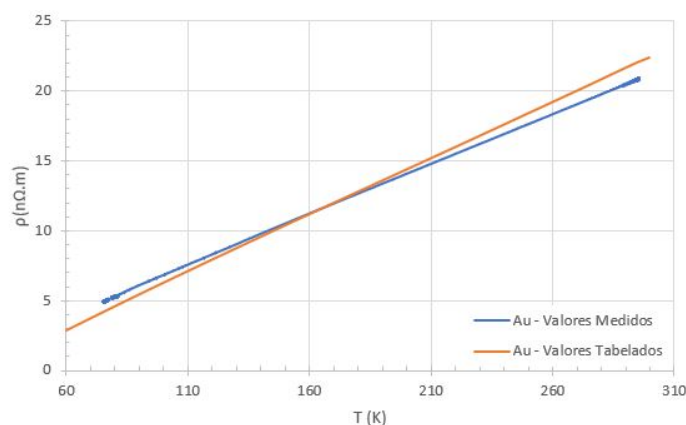


Figura 5.9: Comparação entre as curvas de resistividade em função da temperatura da amostra de ouro da medição B e as curvas tabeladas [25]

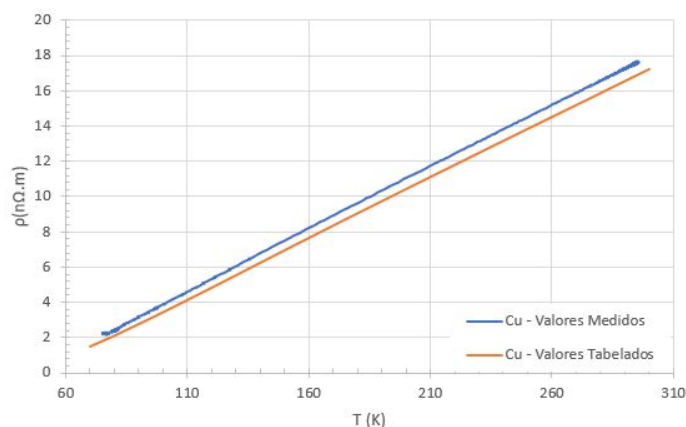


Figura 5.10: Comparação entre as curvas de resistividade em função da temperatura da amostra de cobre da medição B e as curvas tabeladas [25]

5.3. RESISTIVIDADE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

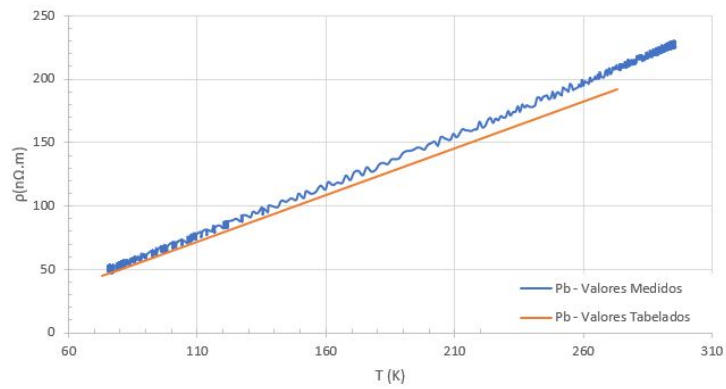


Figura 5.11: Comparação entre as curvas de resistividade em função da temperatura da amostra de chumbo da medição B e as curvas tabeladas [25]

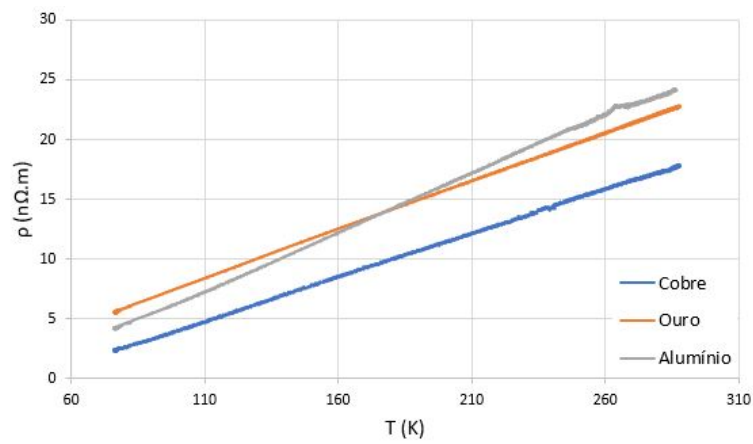


Figura 5.12: Resistividade em função da temperatura de todas as amostras presentes na medição A.

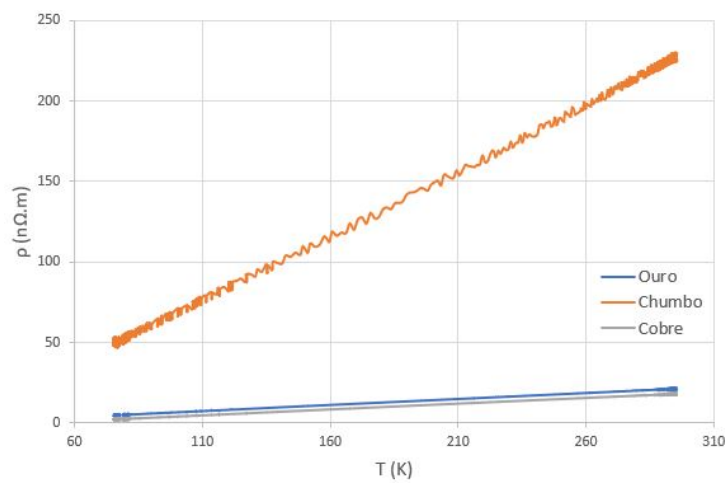


Figura 5.13: Resistividade em função da temperatura de todas as amostras presentes na medição B.

Nos gráficos da Figura 5.12 e 5.13 podemos observar a comparação das resistividades dos diferentes metais correspondentes a *medição A* e a *medição B*, respectivamente. Através destes gráficos podemos aferir que o comportamento da resistividade é relativamente linear nesta zona de temperaturas, porém o coeficiente de proporcionalidade varia para os diferentes metais e medições.

5.3.1 Avaliação e testes às medidas

Devido aos vários desvios verificados entre as curvas dos valores de resistividade medidos em função da temperatura e os valores tabelados, foram realizados vários testes ao sistema, de forma a comprovar se as medidas das tensões aos terminais das amostras e, conseqüentemente, a resistência e resistividade eram válidos.

Foi testado o sistema de aquisição (placa de aquisição PicoLog ADC-24 e o programa de LabVIEW) através de um conector DB25 teste, onde foram soldadas cinco resistências nas mesmas posições onde estavam ligados as conexões às nossas amostras. As resistências soldadas foram anteriormente medidas através do multímetro digital *Agilent 34401A* pelo método dos quatro pontos, tal como acontece com o nosso sistema.

Os resultados da medição com o multímetro digital e com sistema de aquisição estão presentes na Tabela 5.3, assim como o desvio entre as duas medidas. Observando a tabela é possível concluir que os valores são muito próximos e que os desvios entre os mesmos são sempre inferiores a 1 %, portanto, não conseguem explicar as discrepâncias entre as resistividades medidas e as tabeladas.

Tabela 5.3: Comparação entre as medições de resistência do conector DB25 teste efetuadas pelo sistema (placa de aquisição PicoLog ADC-24 e programa LabVIEW) e pelo multímetro digital *Agilent 34401A*.

Amostra	Medida do Sistema (Ω)	Medida do Multímetro (Ω)	Desvio
Amostra 1	117,97	118,42	0,38 %
Amostra 2	326,00	326,86	0,26 %
Amostra 3	176,91	17,27	0,20 %
Amostra 4	99,25	99,78	0,53 %
Platina 100	19,69	19,68	0,06 %

Para que possam ser testadas as conexões realizadas na célula térmica e no conector DB25 que conecta com o sistema de aquisição, foram realizadas amostras teste, também medidas com multímetro digital *Agilent 34401A* antes de serem soldadas à aos conectores que servem de porta-amostras.

As medições efetuadas a estas amostras teste estão indicadas na Tabela 5.4, podemos perceber pela comparação dos resultados que o desvio também não é significativo e que esta parte da montagem também funciona como pretendido.

Foram, ainda, testadas as tensões parasitas da montagem. Para que pudéssemos adquirir as medições das tensões parasitas, foi desligada a fonte de corrente à temperatura

Tabela 5.4: Comparação entre as medições de resistência do conector DB25 teste efetuadas pelo sistema (placa de aquisição PicoLog ADC-24 e programa LabVIEW) e pelo multímetro digital *Agilent 34401A*.

Amostra	Medida do Sistema (Ω)	Medida do Multímetro (Ω)	Desvio
Amostra 1	3,93	3,96	0,76 %
Amostra 2	2,22	2,20	0,91 %
Amostra 3	1,17	1,16	0,86 %
Amostra 4	108,12	109,38	1,15 %
Platina 100	108,22	109,18	0,88 %

ambiente, durante a *medição A* e *medição B*.

Nos gráficos presentes na Figura 5.14 podemos observar as tensões parasitas aos terminais das amostras da *medição A*. É perceptível, ao analisar os gráficos, que os valores das tensões parasitas não são elevados o suficiente para terem um impacto relevante, sendo sempre inferiores a 1% dos valores das tensões medidas.

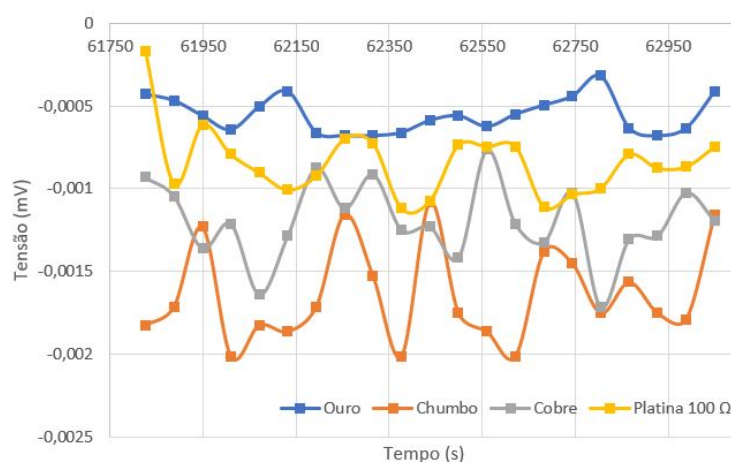


Figura 5.14: Exemplo de gráfico das tensões parasitas aos terminais das amostras da *medição A* a temperatura ambiente.

Podemos concluir assim que os desvios que se verificam entre os valores de resistividade obtidos e os valores de resistividade tabelados para cada metal não se devem ao sistema, pois conseguimos testar a sua precisão e as tensões parasitas, não havendo desvios relevantes para medições realizadas.

De forma a identificar possíveis erros futuros, tanto o conector DB25 teste como as amostras teste serão sempre transportadas conjuntamente com a montagem didática. Assim, é muito simples testar o sistema caso haja alguma dúvida quanto à validade dos valores obtidos numa medição.

5.4 Modelo de Bloch-Grüneisen

Tal como explanado no Capítulo I, segundo a teoria de Bloch-Grüneisen, o comportamento da resistividade reduzida ($\rho(T)/\rho(\theta)$), em função da temperatura reduzida (T/θ) é igual para todos os metais, havendo sobreposição de curvas quando apresentados no mesmo gráfico.

Para poder realizar o tratamento de dados que nos permita analisar as curvas de $\rho(T)/\rho(\theta)$ em função de T/θ foram utilizados os valores de temperatura de Debye da Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Temperaturas de Debye de cada metal utilizado nas medições efetuadas. [26]

Metal	Temperatura de Debye (θ)
Alumínio (Al)	428 K
Chumbo (Pb)	105 K
Cobre (Cu)	343 K
Ouro (Au)	165 K
Platina (Pt)	240 K

Os valores de resistividade elétrica estão intrinsecamente ligados aos valores de comprimentos e diâmetros dos fios metálicos utilizados para as amostras, como mostra a expressão 5.1. Assim, devido às medidas do diâmetro serem da ordem de grandeza das dezenas de micrómetros e as medidas do comprimento da ordem de grandeza dos milímetros, os valores da resistividade estão muito suscetíveis a desvios caso exista um erro de medição.

Para além dos possíveis erros sistemáticos que o cálculo da resistividade poderia ter devido às características geométricas, como não temos as características geométricas da Pt-100, não poderíamos fazer a sua análise e perderíamos uma amostra, enfraquecendo assim os resultados obtidos.

Por este motivo, foi realizado o tratamento de dados para a resistência reduzida $\left(\frac{R(T)}{R(\theta)}\right)$ que, como demonstrado na expressão 5.2, é igual à resistividade reduzida $\left(\frac{\rho(T)}{\rho(\theta)}\right)$, não sendo necessário utilizar as características geométricas das amostras.

$$\frac{\rho(T)}{\rho(\theta)} = \frac{R(T) \frac{S}{D}}{R(\theta) \frac{S}{D}} = \frac{R(T)}{R(\theta)} \quad (5.2)$$

Os valores de $R(\theta)$ utilizados para realizar os cálculos da resistência reduzida podem ser consultados nas tabelas 5.6 e 5.7 e foram retirados das medidas para o caso do ouro, platina e chumbo e extrapolados para as amostras do cobre e do alumínio.

É apresentado no gráfico da Figura 5.15 as curvas da resistência reduzida em função da temperatura reduzida para a *medição A*. Podemos observar que as curvas dos metais

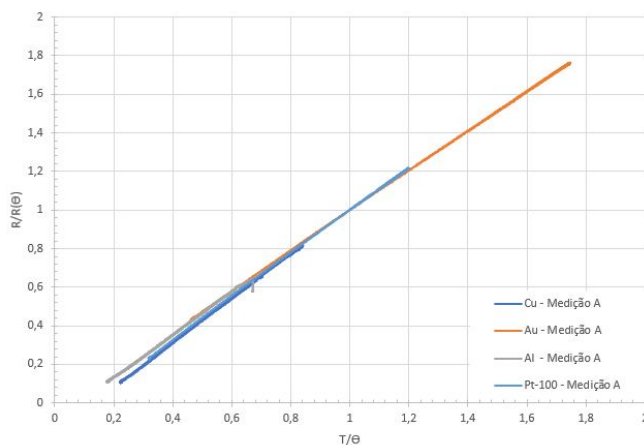
Tabela 5.6: Valores da Resistência das diferentes amostras da *medição A* à temperatura de Debye.

Elemento	R (θ)
Alumínio (Al)	0,8 Ω
Ouro (Au)	1,83 Ω
Cobre (Cu)	0,108 Ω
Platina 100 Ω (Pt-100)	87,1 Ω

Tabela 5.7: Valores da Resistência das diferentes amostras da *medição B* à temperatura de Debye.

Elemento	R (θ)
Ouro (Au)	1,56 Ω
Chumbo (Pb)	0,0037 Ω
Cobre (Cu)	0,203 Ω
Platina 100 Ω (Pt-100)	87,0 Ω

que no gráfico da Figura 5.12 estavam bastante distantes, estão sobrepostas e com o mesmo declive. Assim, percebemos que o comportamento dos metais presentes na *medida A* seguem o previsto pelo modelo de Bloch-Grüneisen.

Figura 5.15: Resistência reduzida em função da temperatura reduzida de todas as amostras presentes na medição *medição A*.

O gráfico da Figura 5.16 apresenta o mesmo comportamento para os metais das *medidas B*, sobrepondo as curvas que no gráfico da Figura 5.13 estavam bastante distantes. Neste conjunto de medidas temos o contributo do chumbo que apresenta uma resistividade uma ordem de grandeza superior à dos outros dois metais e, quando dividido pela resistividade à temperatura de Debye, em função da temperatura dividida pela temperatura de Debye, sobrepõem-se perfeitamente com as curvas do ouro e do cobre.

No gráfico da Figura 5.17 podemos observar todas as amostras presentes tanto na

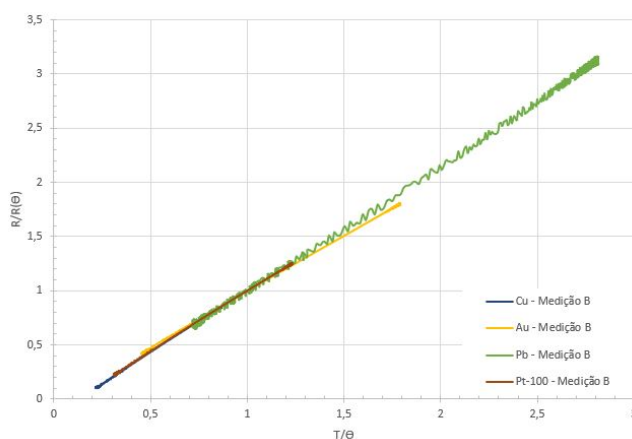


Figura 5.16: Resistência reduzida em função da temperatura reduzida de todas as amostras presentes na medição *medição B*.

medida A como na *medida B*. Podemos perceber que o comportamento das curvas é independente da corrente que atravessa as amostras e da origem, preparação e comprimento da amostra. Podemos concluir também que as curvas referentes às amostras de platina 100 acompanham as restantes curvas, sobrepondo-se também como esperados.

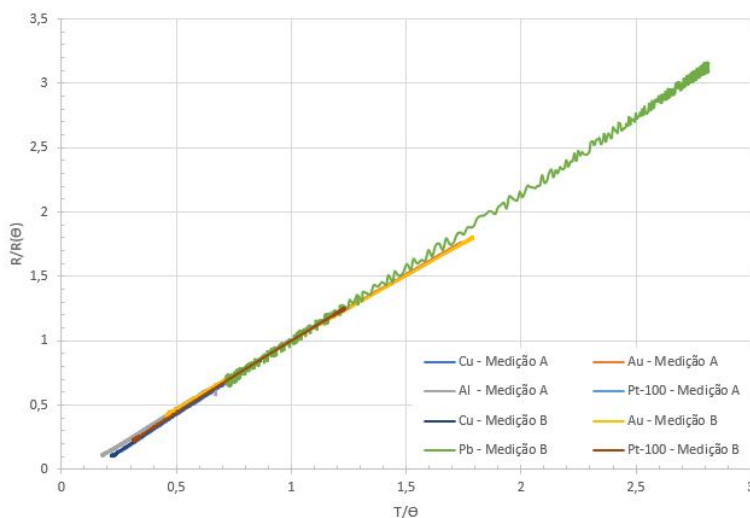


Figura 5.17: Resistência reduzida em função da temperatura reduzida de todas as amostras presentes na medição *medição A* e *medição B*.

Através destes resultados obtidos a partir da montagem criada e do procedimento que será realizado pelos estudantes, foi possível depreender que a montagem funciona como era pretendido e que os resultados fornecidos por esta são bastante satisfatórios.

CONCLUSÕES

O objetivo primordial deste trabalho que era construir uma montagem que permitisse realizar uma atividade prática em que fosse possível observar o comportamento da resistividade elétrica de diferentes metais em função da temperatura foi cumprido.

Foram desenhadas cinco peças que, quando montadas, fizeram com que este sistema fosse compacto, leve e de fácil mobilidade, que eram as prioridades fundamentais deste projeto, atendendo ao seu objetivo final. Também pensando no objetivo final, foram realizadas diferentes peças, em vez de apenas uma peça maciça e única para que pudesse dar resposta a modificações que se pretendia realizar na montagem, como introduzir mais amostras ou alterar o tubo de proteção dos fios.

A ligação das amostras à placa de aquisição por fios de cobre está protegida pelo tubo de acrílico e pelos conectores e respetivos fios. Estas ligações são seguras e bem assinaladas, de forma a que seja fácil identificar um erro, facilitando a correção do mesmo.

No que toca à aquisição dos dados, o projeto também cumpriu o que se propunha. A placa de aquisição PicoLog ADC-24 conseguiu fornecer uma aquisição de dados que abrange uma larga opção de escalas e que pode ser adaptada a cada amostra em questão, o que permitiu uma maior precisão dos dados adquiridos.

A plataforma desenhada no software LabVIEW conseguiu comunicar com a placa de aquisição e, numa plataforma simples e intuitiva, permite a visualização dos dados adquiridos, assim como as diferentes opções que podem adaptar as escalas e tempo de aquisição às amostras analisadas. Esta plataforma encaixa-se completamente no que será o plano de aula e tem toda a informação necessária à boa utilização do sistema bastante visível.

Os resultados obtidos atrás deste sistema, apresentados no capítulo anterior, demonstram que este pode ser usado para medir a resistividade de quatro amostras metálicas na gama de temperaturas de 77 K a 300 K. Estes resultados podem comprovar o modelo

de Bloch-Grüneisen. O facto destes resultados serem exportados para uma folha de EXCEL permite aos estudantes, de uma forma simples, realizar todos os cálculos necessários para o tratamento de dados, possibilitando que estes desenvolvam todo o conhecimento prático e teórico pretendido com esta atividade prática.

Apesar deste projeto estar pronto a ser utilizado numa aula prática, existem aspetos que poderão ser melhorados no futuro, de modo a tornar esta montagem ainda mais eficiente, tais como: a criação de um sistema de aquecimento que permita que a temperatura dentro da célula térmica variar de 77 K a 400 K; o desenvolvimento de uma caixa de acrílico que possa imobilizar a placa de aquisição PicoLog ADC-24 e os fios que estão ligados a esta e, devido às ligações entre os fios metálicos e os conectores serem bastante frágeis, poderia ser utilizado uma resina que imobilizasse os fios metálicos das amostras, de forma a tornar mais fácil o manuseamento dos mesmos quando colados aos conectores.

Concluindo, esta montagem poderá ser utilizada, tal como proposto, nas aulas práticas da Unidade Curricular de Física do Estado Sólido, na qual os estudantes poderão realizar as próprias amostras; colocá-las nesta montagem, arrefecê-las através da imersão das mesmas em azoto líquido; monitorizar a descida, estabilização e aumento gradual da temperatura e o seu impacto nas amostras e nas suas resistividades, através da interface e realizar o tratamento de dados que permita verificar a existência de uma correlação entre a resistividade reduzida e a temperatura reduzida de todos os metais analisados.

BIBLIOGRAFIA

- [1] N. Ashcroft e D. Mermin. *Solid State Physics*. Cornell University, 1976, p. 826. ISBN: 0-03-083993-9.
- [2] R. Turton. *The Physics of Solids*. Oxford University Press, 2000, p. 418. ISBN: 0-19-850352-0.
- [3] J. Casquilho e P. Teixeira. *Introdução À Física Estatística*. IST Press, 2011, p. 405. ISBN: 978-972-8469-99-3.
- [4] H. Rosenberg. *Low Temperature Solid State Physics: Some Selected Topics*. 1963, pp. 1–420.
- [5] J. Ekin. *Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements: Cryostat Design, Material Properties and Superconductor Critical-Current Testing*. 2006, pp. 1–704. ISBN: 9780191717710. DOI: [10.1093/acprof:oso/9780198570547.001.0001](https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198570547.001.0001).
- [6] R. A. Matula. “Electrical resistivity of copper , gold , palladium , and silver”. Em: 1147.1979 (2009). DOI: [10.1063/1.555614](https://doi.org/10.1063/1.555614).
- [7] E. Eser e H. Koç. “Investigations of temperature dependences of electrical resistivity and specific heat capacity of metals”. Em: *Physica B: Condensed Matter* 492 (2016), pp. 7–10. ISSN: 09214526. DOI: [10.1016/j.physb.2016.03.032](https://doi.org/10.1016/j.physb.2016.03.032). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physb.2016.03.032>.
- [8] J. F. Wang, C. J. Zhang e J. F. Hu. “Correlativity and the origin of the T2 difference between the Bloch-Grüneisen law and the Debye law”. Em: *Canadian Journal of Physics* 82.8 (2004), pp. 585–592. ISSN: 0008-4204. DOI: [10.1139/p04-039](https://doi.org/10.1139/p04-039). URL: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/p04-039>.
- [9] J. Wemans. *Criomóvel - Relatório Final da Cadeira de Projecto e Estágio*. Departamento de Física, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2002. Documento não publicado.
- [10] A. C. Silva e J. L. Ferreira. *Termístores - Coeficiente de temperatura*. 2018. Documento de acesso privado.
- [11] D. de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. *T5 - Temperatura e termometria*. 2015. Documento de acesso privado.

- [12] PASCO. *Resistivity Experiment - EX-5534*. 2018 [Consultado em 30/01/2018]. URL: https://www.pasco.com/prodCatalog/EX/EX-5534_resistivity-experiment/index.cfm.
- [13] *The Jandel Cylindrical Probe combined with the RM3000 Test Unit For Measuring Sheet Resistance or Volume Resistivity*. Rel. téc. Brigde Technology e Jandel Engineering LTD.
- [14] B. Technology. *The Jandel Cylindrical Probe combined with the RM3000 Test Unit For Measuring Sheet Resistance or Volume Resistivity*. 2017 [Consultado em 30/01/2018]. URL: <http://four-point-probes.com/jandel-cyl-rm3000-four-point-probe-system/>.
- [15] *High/Low Temperature Macor/Glass Four Point Probe Head*. Rel. téc. Brigde Technology e Jandel Engineering LTD.
- [16] B. Tecnology. *High/Low Temperature Macor/Glass Four Point Probe Head*. 2017 [Consultado em 30/01/2018]. URL: <http://four-point-probes.com/jandel-highlow-temperature-macorglass-four-point-probe-head/>.
- [17] *Temperature dependence of different resistors and diodes*. Rel. téc. PHYWE e TESS Experts.
- [18] P. TESS Experts. *Temperature dependence of different resistors and diodes*. [Consultado em 28/01/2018]. URL: <https://www.phywe.com/en/temperature-dependence-of-different-resistors-and-diodes-with-a-multimeter.html>.
- [19] *4 Point Method / Measurement of low resistances*. Rel. téc. TESS Experts e PHYWE.
- [20] P. TESS Experts. *4 Point Method / Measurement of low resistances*. [Consultado em 28/01/2018]. URL: <https://www.phywe.com/en/4-point-method-measurement-of-low-resistances-ohm-s-law.html>.
- [21] A. Labware. *Four Probe Method, AL-212*. 2010 [Consultado em 23/01/2018]. URL: <http://acumenlabware.com/electronics-training-kits/four-probe-method.html>.
- [22] A. A. CIRCUITS. *Kelvin (4-wire) Resistance Measurement*. 2018.
- [23] A. Azevedo e A. Silva. *Relatório do trabalho sobre medição de temperatura com PT100*. Rel. téc. FEUP - Faculdade de Engenharias da Universidade do Porto.
- [24] P. Tecnology. *ADC-20 and ADC-24 Precision Data Loggers*. 2014. [Consultado em 28/01/2018]. URL: <https://www.picotech.com/data-logger/adc-20-adc-24/precision-data-acquisition>.
- [25] *Selected Cryogenic Data Notebook*. Brookhaven National Laboratory, 1980.
- [26] C. Kittel. *Introduction to Solid State Physics*. Wiley, 1996, p. 673. ISBN: 0471111813.

A P Ê N D I C E



PROTOCOLLO EXPERIMENTAL

Guião Prático

Medição da Resistividade em função da Temperatura

25 de novembro de 2018

1 Introdução Teórica

1.1 Teoria de Drude

O Modelo de Drude [1,2], sugerido por Paul Drude em 1900, foi um modelo essencial para a compreensão dos conceitos de resistividade e condutividade elétrica.

Este modelo descreve os metais como sólidos onde os iões são estacionários na rede cristalina e os eletrões de valência são considerados partículas carregadas que se movem livremente e colidem com os iões, tal como descrito na figura 1. As colisões são acontecimentos instantâneos que reduzem drasticamente a velocidade do eletrão

Quando não existe um campo elétrico aplicado, este modelo descreve as trajetória dos eletrões como trajetórias aleatórias, ignorando as interações eletrão-eletrão (*Aproximação de Eletrão Independente*) e as interações eletrão-ião (*Aproximação do Eletrão Livre*) entre as colisões.

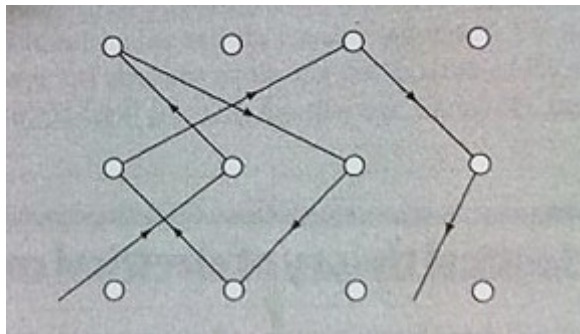


Figura 1: Esquema da trajetória dos eletrões sugerida por Drude. [2]

Devido às semelhanças entre os eletrões no metal e as moléculas num Gás Perfeito, foi desenvolvido uma teoria similar à da teoria cinética dos gases. Começou por usar os conceitos de velocidade média (v_t), velocidade média do eletrão que percorre o metal; livre percurso médio (λ), distância média que um eletrão percorre entre duas colisões sucessivas; tempo de colisão (τ), tempo médio que decorre entre duas colisões sucessivas e a frequência de colisão ($1/\tau$).

Quando uma diferença de potencial é aplicada no metal, um campo elétrico é criado e, consequentemente, os eletrões tendem a seguir a direção do polo positivo. Mesmo sendo este o sentido preferencial, continuam a existir colisões entre os eletrões e os iões e, por esse motivo, alguns eletrões de condução continuam parte da sua trajetórias de forma aleatórias. Contudo, existe sempre uma influência da força elétrica nestas trajetórias, havendo sempre uma tendência na direção do polo positivo.

Esta resistência ao movimento das partículas descrita pelo modelo de Drude explica o fenómeno da resistividade elétrica, assim como o Efeito de Joule, pois existe transferência de energia dos eletrões para os iões nas colisões, justificando a relação entre o aumento da corrente e o aumento do calor do metal.

No quadro deste modelo, a condutividade elétrica pode ser calculada pela seguinte fórmula [1,2]:

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \quad (1)$$

Onde n é a densidade volumica de eletrões de condução, e é a carga de um eletrão, m é a massa do eletrão.

Por sua vez, a resistividade é calculada por:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m}{ne^2\tau} \quad (2)$$

No entanto, esta teoria é profundamente clássica e, por esse motivo, apresenta algumas falhas que não permitem descrever os fenómenos de interação entre os eletrões e os iões de um sólido.

1.2 Teoria de Bloch

Na Teoria de Drude definimos os iões como partículas inertes, ignorando as interações eletrostáticas eletrão-ião e eletrão-eletrão. Assim, precisamos de ter em conta estas interações, principalmente a interação ião-eletrão, para poder formular uma teoria que descreva mais corretamente possível a interação entre os iões e os eletrões e, por sua vez, a resistividade elétrica.

Félix Bloch resolveu, pela primeira vez, em 1925, a equação quântica para um eletrão numa rede cristalina perfeita. Esta solução deduz a função de onda do eletrão como uma onda com a mesma simetria de translação da rede cristalina, conseqüentemente o eletrão irá movimentar-se na rede sem nunca colidir com iões ou ser defletido pelas mesmos.

Segundo esta resolução não existem interferências na trajetória do eletrão porque a rede cristalina tida em conta é perfeita. A dispersão dos eletrões, ou seja, a origem da resistividade elétrica, advém de imperfeições da rede.

Estas imperfeições devem-se ao facto dos iões não estão num estado estacionário. Os iões da rede cristalina estão em contínua vibração à volta da sua posição de equilíbrio. Assim, devido a estas vibrações denominadas de fonões, a rede cristalina não pode ser considerada perfeita, não havendo simetria de translação.

Consequentemente, a solução de Bloch deixa de ser válida e as imperfeições da rede levam à dispersão dos eletrões que transferem energia cinética para a rede cristalina.

1.3 Relação de Bloch-Grüneisen

Usando como ponto de partida o Modelo de Drude, o Modelo de Bloch e algumas relações estudadas por Eduard Grüneisen, surgiu uma relação entre a temperatura e a resistividade, proveniente da dispersão dos fonões. Esta relação é chamada de fórmula de Bloch-Grüneisen[3-5] e relaciona estas duas grandezas da seguinte forma:

$$\rho_i(T) = \frac{C}{M\theta} \left(\frac{T}{\theta}\right)^5 \int_0^{\frac{\theta}{T}} \frac{z^5 e^z}{(e^z - 1)^2} dz \quad (3)$$

Onde T representa a temperatura, θ representa a temperatura de Debye, uma característica do sistema de fonões do metal, M é a massa atômica e C uma constante que depende do metal em causa.

Quando estudamos os limites da Fórmula 3, obtemos dois tipos de simplificações desta relação [3-5].

Regime de Baixa Temperatura :

$$\rho_i(T) = 124,431 \frac{C}{M\theta} \left(\frac{T}{\theta} \right)^5, T \leq (\theta/10) \quad (4)$$

Regime de Alta Temperatura :

$$\rho_i(T) = \frac{C}{4M\theta} \left(\frac{T}{\theta} \right), T \geq (\theta/2) \quad (5)$$

As equações 4 e 5 são as mais utilizadas em contextos reais, pois abrangem uma grande gama de temperaturas.

Quando considerada a relação de Bloch-Grüneisen no regime de baixas temperaturas, percebemos que existe uma dependência com T^5 e, quando considerado o regime de altas temperaturas, a relação de dependência é com T . No entanto, os metais estão, normalmente, expostos ao regime da alta temperatura.

Independentemente do regime de temperaturas, podemos afirmar, segundo este modelo, que a resistividade reduzida $\frac{\rho(T)}{\rho(\theta)}$ é uma função de $\frac{T}{\theta}$ para qualquer metal. Para mostrar esta dependência, simplificamos a expressão 3, transformando-a na expressão equivalente 6. Quando considerada esta expressão para a temperatura de Debye, obtemos a expressão 7.

$$\rho_i(T) = \frac{C}{M\theta} \left(\frac{T}{\theta} \right)^5 \int_0^{\frac{\theta}{T}} f(z) dz \quad (6)$$

$$\rho(\theta) = \frac{C}{M\theta} \int_0^1 f(z) dz \quad (7)$$

Quando dividido $\rho(T)$ por $\rho(\theta)$ obtemos a expressão 8 que pode ser simplificada na expressão 9 que demonstra que a resistividade reduzida é uma função da temperatura reduzida.

$$\frac{\rho(T)}{\rho(\theta)} = \left(\frac{T}{\theta} \right)^5 \frac{\int_0^{\frac{\theta}{T}} f(z) dz}{\int_0^1 f(z) dz} \quad (8)$$

$$\frac{\rho(T)}{\rho(\theta)} = f\left(\frac{T}{\theta}\right) \quad (9)$$

No gráfico da Figura 2 podemos observar a verificação desta lei para ouro, sódio, cobre, alumínio e níquel. As curvas destes metais sobrepõem-se devido à interação dos eletrões com os fonões da estrutura cristalina ser descrita pela mesma relação entre estas duas grandezas. Podemos também verificar que o regime ρ proporcional a T é atingido quando $\frac{T}{\theta} = 0,2$.

Assim, será medido o $R(T)$, de forma a comprovar o comportamento de diferentes amostras metálicas é descrito pela relação de Bloch-Grüneisen.

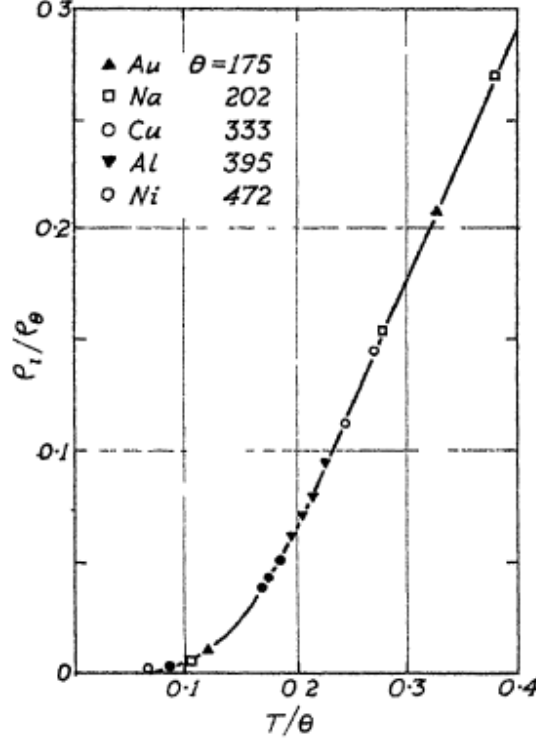


Figura 2: Gráfico da função de Bloch-Grüneisen juntamente com alguns pontos experimentais. [3]

2 Sistema Experimental

2.1 Medição de Resistividade pelo Método dos Quatro Pontos

O método de medida da resistência a utilizar neste trabalho será o Método de Quatro Pontos. Este método, como o próprio nome indica, utiliza quatro pontos de contacto com o metal, dois dos contactos para permitir a passagem da corrente na amostra e dois contactos para medir a tensão. Por separar os contactos relativos à corrente e os contactos relativos à tensão, elimina grande parte da resistência de contacto entre os fios de medida e a amostra (colados ou soldados).

No nosso caso, iremos utilizar as duas saídas de +5V e -5V da Placa ADC-24 para gerar corrente que posteriormente será aplicada nas amostras metálicas. Ligando duas entradas output na placa de aquisição podemos adquirir a variação da tensão, como podemos observar na Figura 3a.

A adição de um equipamento para adquirir a corrente presente no fio iria adicionar custos ao projeto e iria diminuir a sua mobilidade, iremos aplicar uma tensão a uma resistência R_0 , que será conhecida e medir a tensão nos seus terminais, assim, podemos medir a corrente pela medida da tensão aos terminais de R_0 como ilustrado na Figura 3b.

Como sabemos, a corrente aplicada ao fio e após medir a diferença de potencial aos terminais da nossa amostra metálica (R), podemos calcular a resistência através da Lei de Ohm.

$$R = \frac{V}{I} \quad (10)$$

Onde r representa a resistência da amostra, V a diferença de potencial nos terminais da

amostra, I a corrente que a atravessa. E, assim, facilmente poderemos calcular a resistividade:

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (11)$$

Onde ρ a resistividade, L o comprimento do fio ou filme metálico utilizado e S a secção transversal atravessada pela corrente deste mesmo fio ou filme.

Este método será usado na medição da resistência das nossas quatro amostras de metais diferentes. Desta forma, serão necessárias quatro ligações por cada amostra de metal. No entanto, a nossa placa com oito entradas diferenciais permitira fazer todas estas medidas simultaneamente.

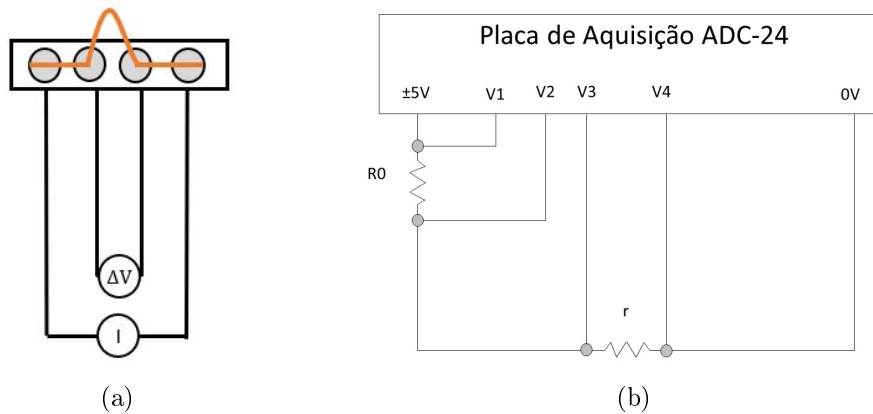


Figura 3: Esquemas ilustrativos da aplicação do método dos quatro pontos: a) Ilustração de uma medição pelo método de quatro pontos às amostras e b) Ilustração da utilização do método de quatro pontos no sistema.

3 Objetivo do Trabalho

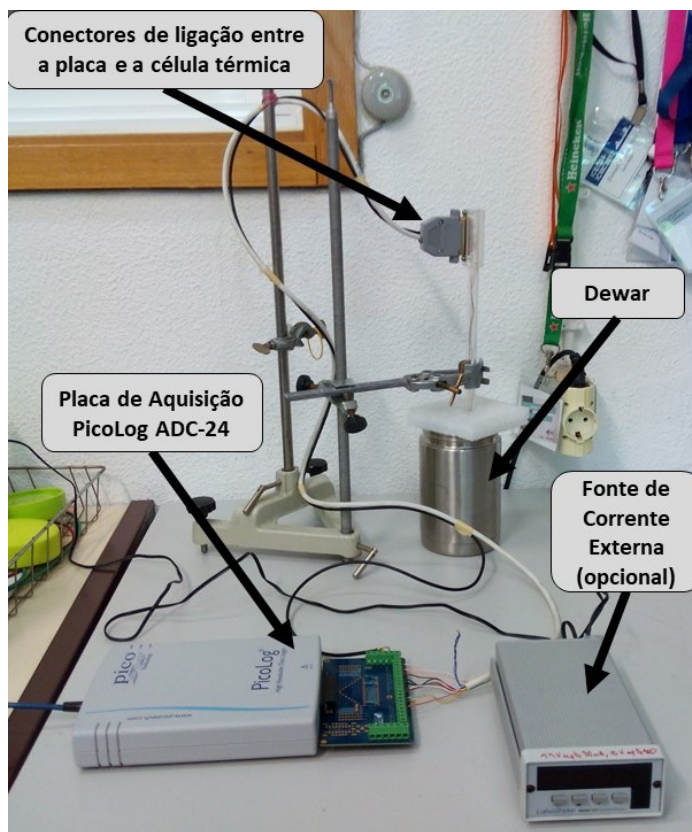
Neste trabalho teremos como objetivo analisar a variação da resistividade em função da temperatura, de forma a demonstrar a relação referida na Introdução Teórica (Equação 9).

4 Protocolo

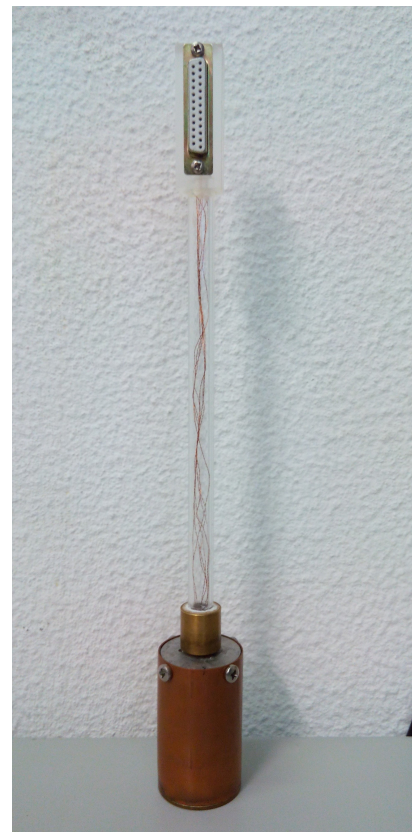
O sistema desenhado para esta experiência é composto por uma célula térmica, na Figura 4b, onde se encontram quatro amostras metálicas e uma platina que irá ser utilizada como termóstato (Pt-100). Esta célula está ligada, através de um conector, à placa de aquisição PicoLog ADC-24, cujas propriedades poderão ser consultadas no Anexo B. A placa, por sua vez, irá transmitir os dados ao computador, onde poderemos visualizá-los.

O nosso sistema irá medir as tensões ao terminal das amostras, pelo método dos quatro pontos referido na Introdução Teórica. O esquema da medição encontra-se no Anexo A, Figura 1 e Figura 1, onde podemos observar como será realizada esta medição.

Esta atividade tem dois momentos bastante distintos, um primeiro onde será realizado a preparação de uma amostra metálica e um segundo momento onde será realizado o arrefecimento da célula térmica com azoto líquido e a medição da resistência destas amostras com a variação da temperatura.



(a)



(b)

Figura 4: Sistema de medição de $R(T)$ completamente montado: a) Sistema completo e b) Célula térmica (77K a 300K).

4.1 Preparação das Amostras

Nesta primeira aula os alunos deverão preparar uma das amostras que posteriormente serão analisadas. Desta forma, deverão seguir os seguintes passos:

1. Colocar o conector, representado na Figura 5a, de uma forma estável na binocular;
2. Colar uma das extremidades do fio metálico no contacto sinalizado como 1 no esquema da Figura 5b;
3. Aguardar 15 minutos para que o contacto seque, colar a outra extremidade da amostra ao contacto 4;
4. Aguardar mais 15 minutos e colar o conector 2 e, 15 minutos depois, o conector 3, devendo a amostra ficar semelhante ao demonstrado na Figura 5b;
5. Efetuada a colagem, deverá certificar-se que todos os contactos estão bem feitos por inspeção visual e deixar a amostra secar até a aula seguinte;

Cuidados a ter na colagem das amostras:

- Utilizar sempre pinças de pontas planas no manuseamento das amostras para evitar a danificar a amostra exercendo uma pressão excessiva;
- Devido à fragilidade dos fios metálicos, nunca deverá ser feita demasiada pressão sobre os fios.

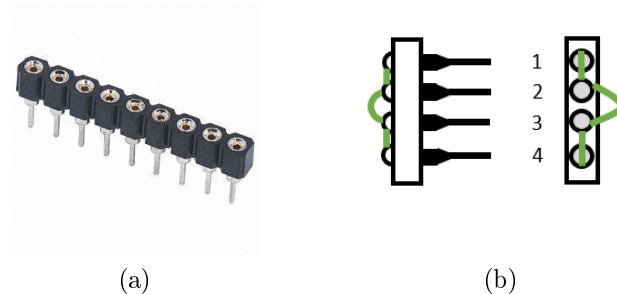


Figura 5: Ilustrações dos conectores onde deverá ser efetuadas as amostras: a) Exemplo do conector utilizado para colar as amostras e b) Esquema de como deve ser colada as mostras.

4.2 Arrefecimento das Amostras

Na segunda aula os alunos irão operar o sistema descrito nas fotografias da Figura 4 e arrefecer a célula térmica que contém as amostras. Assim, deverão seguir os seguintes passos:

1. Medir com um multímetro as resistências 1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4 e 3-4 (referentes a Figura 5b. Registrar os valores medidos e realizar uma análise crítica aos valores, percebendo se apresentam anomalia que possa indicar uma colagem mal feita ou uma amostra danificada.
2. Medir o comprimento da amostra entre o contacto 2 e 3, pois é a partir deste comprimento que será medida a tensão do fio;

3. Confirmar que todo o sistema está montado como descreve a Figura 4 e os anexos referentes ao sistema;
4. Abrir a célula térmica e identificar, através do esquema na Figura 6, onde deverá ser colocada a platina que irá medir a temperatura do sistema;
5. Colocar cuidadosamente as amostras no sistema, sem tocar na parte inferior da célula;
6. Registrar qual a posição de cada amostra;
7. Iniciar o programa;
8. Medir as tensões parasitas do sistema;
9. Alterar os valores do Diâmetro e Comprimento de cada amostra na barra "Dimensões dos Fios" do programa;
10. Verificar se os valores calculados para a resistividade são os esperados (referidos na Tabela 1);
11. Arrefecer as amostras com azoto líquido até estas estarem completamente submersas e colocar a proteção isolante no *dewar*;
12. Medir as tensões parasitas do sistema;
13. Observar o comportamento das tensões e, por sua vez, resistividade com a variação da temperatura;
14. Aguardar que todo o azoto líquido evapore, após este evaporar a temperatura irá subir gradualmente até a temperatura ambiente (este processo irá demorar algumas horas). Os dados de temperatura e tensões utilizados para obter $R(T)$ e $\rho(T)$ utilizados para comprovar a equação 9 deverão ser correspondentes a esta subida.

Tabela 1: Valores esperados do sistema para corrente e resistência.

Corrente atravessa Pt-100 (fonte de corrente interna)	$\simeq 0,53 \text{ mA}$
Corrente atravessa as amostras (fonte de corrente interna)	$\simeq 0,71 \text{ mA}$
Corrente atravessa Pt-100 (fonte de corrente externa)	$\simeq 0,61 \text{ mA}$
Resistência Pt-100 ($T=300 \text{ K}$)	$\simeq 110 \text{ } \Omega$

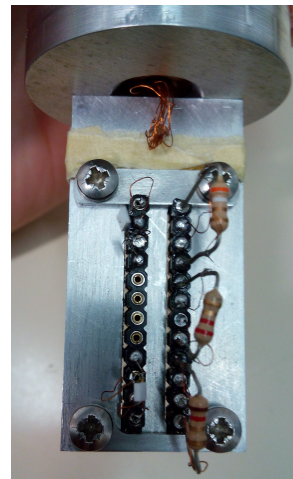
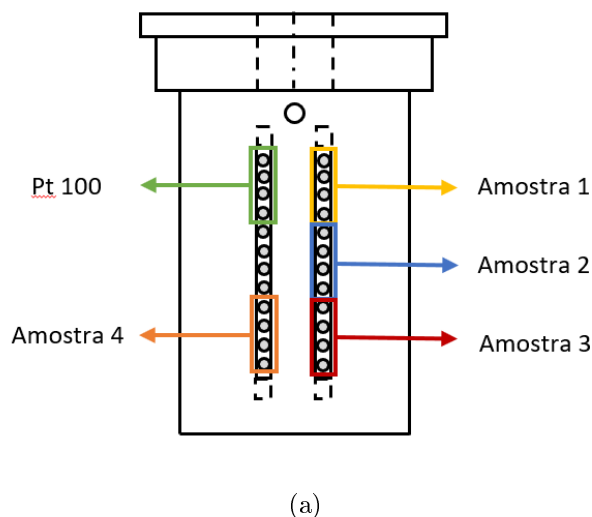


Figura 6: Interior da célula térmica: a) Esquema ilustrativo do posicionamento das amostras e b) Fotografia das amostras na célula térmica.

5 Tratamento de dados

Os estudantes deverão efetuar algum trabalho de pesquisa e cálculos fora da aula. Primeiramente, deverão preparar a aula do Arrefecimento das Amostras e, após a realização desta, deverão fazer algum tratamento de dados para, posteriormente, realizar o relatório da atividade prática.

5.1 Preparação da parte do Arrefecimento das Amostras

Após a preparação das amostras os estudantes deverão:

1. Calcular a resistência esperada desta amostra (utilizado uma corrente de 1 mA);
2. Traçar numa folha de EXCEL as curvas dos resultados tabelados da resistividade destas amostras com a variação de temperatura.

5.2 Relatório da Atividade Prática

O programa utilizado na segunda aula irá formular uma folha de EXCEL, igual ao da Figura 7, cujo cabeçalho está explicado na Tabela 2. Com esses dados deverá:

1. Calcular a Resistência e Resistividade de cada amostras;
2. Comparar as Resistividades calculada das amostras com as Resistividade teóricas;
3. Identificar ou extrapolar o R_θ utilizando o T_θ em anexo;
4. Calcular $\frac{R}{R_\theta}$ e $\frac{T}{\theta}$ para cada amostra;
5. Realizar os seguintes gráficos:

- (a) R em função de T de todas amostras;

- (b) ρ em função de T de todas amostras;
(c) $\frac{R}{R_\theta}$ em função de $\frac{T}{\theta}$ para todas as amostras.

Deverá retirar conclusões sobre os resultados obtidos de acordo com a teoria de Drude, Bloch e Grüneisen.

Tempo (s)	I Pt 100 (mA)	I amostras (mA)	Temp. Pt (K)	Rc Pt (mV)	Pt 100 (mV)	Rc Ext_Amostras (mV)	Amostra 1 (mV)	Amostra 2 (mV)	Amostra 3 (mV)	Amostra 4 (mV)	Rc Int_Amostras (mV)
0	0,606841	6,230312	30,977	60,908653	66,516687	312,5	28,23376	0,11785	1,73124	625	0,13981
20,911196	0,607116	10,52671	298,011522	60,936266	66,571039	527,998719	28,244903	0,117836	1,731422	625	0,140462
26,063491	0,606963	10,526003	298,11431	60,920844	66,569223	527,963254	28,248172	0,116196	1,734947	1122,803375	0,140183
86,227932	0,607039	10,526774	298,377772	60,928536	66,597097	528,001923	28,251995	0,117896	1,734193	1124,731287	0,139996
146,359371	0,607035	10,527214	298,454511	60,928099	66,611775	528,023976	28,245313	0,119032	1,731795	1124,880746	0,139987
206,496811	0,607154	10,527069	298,088332	60,940029	66,56289	528,016749	28,240093	0,118245	1,731832	1124,7444	0,140024
266,653252	0,607097	10,52711	298,165764	60,934376	66,628259	528,018761	28,239594	0,117975	1,73274	1124,610737	0,14022
275,803775	0,607127	10,526832	298,315715	60,937365	66,611765	528,004828	27,342041	0,115922	1,642509	1121,625587	0,140024

Figura 7: Cabeçalho do ficheiro criado pela plataforma LabVIEW

Tabela 2: Informações sobre as ligações do conector e da placa de aquisição.

Cabeçalho	Significado
I Pt100 (mA)	Corrente que percorre a platina utilizada como termóstato
I amostras (mA)	Corrente que percorre as amostras
Temp. Pt (K)	Temperatura calculada através da Pt-100
Rc Ext_Amostras (mV)	Tensão aos terminais da Resistência que calcula a corrente (externa)
Amostra 1-4 (mV)	Tensões aos terminais da amostra 1-4
Rc Innt_Amostras (mV)	Tensão aos terminais da Resistência que calcula a corrente (interna)

6 Bibliografia

- [1] N. Ashcroft e D. Mermin. Solid State Physics. Cornell University, 1976, p. 826. i s b n: 0-03-083993-9
- [2] R. Turton. The Physics of Solids. Oxford University Press, 2000, p. 418. i s b n: 0-19- 850352-0.
- [3] H. Rosenberg. Low Temperature Solid State Physics: Some Selected Topics. 1963, pp. 1– 420.
- [4] J. Ekin. Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements: Cryostat Design, Material Properties and Superconductor Critical-Current Testing. 2006, pp. 1–704. i s b n: 9780191717710. d o i: 10.1093/acprof:oso/9780198570547.001.0001.
- [5] R. A. Matula. “Electrical resistivity of copper , gold , palladium , and silver”. Em: 1147.1979 (2009). d o i: 10.1063/1.555614 .

A Anexo I: Descrição da Montagem

O sistema utilizado para esta atividade prática é constituído por uma placa de aquisição PicoLog ADC-24 que está, por sua vez, está conectada a célula térmica através de um conector. Todas as ligações do sistema estão discriminadas na Tabela 1 e em todos os esquemas que se seguem.

Tabela 1: Informações sobre as ligações do conector e da placa de aquisição.

Canal da Placa	Cor do Fio do Conector	Função
1	-	Terminal R ($100,37\Omega$)
2	Azul	Terminal R ($100,37\Omega$)
3	Verde	Terminal Pt-100
4	Vermelho	Terminal Pt-100
5	-	Terminal R ($50,158\Omega$)
6	Rosa (Corrente Externa)	Terminal R ($50,158\Omega$)
7	Castanho	Terminal Amostra 1
8	Verde	Terminal Amostra 1
9	Preto	Terminal Amostra 2
10	Vermelho	Terminal Amostra 2
11	Branco	Terminal Amostra 3
12	Azul Claro	Terminal Amostra 3
13	Amarelo	Terminal Amostra 4
14	Laranja	Terminal Amostra 4
15	-	Terminal R ($100,71\Omega$)
16	Rosa (Corrente Interna)	Terminal R ($100,71\Omega$)

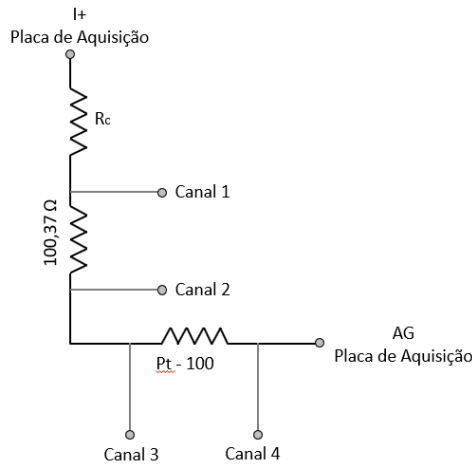


Figura 1: Esquema do sistema utilizado para medir a resistência da platina utilizada como termóstato.

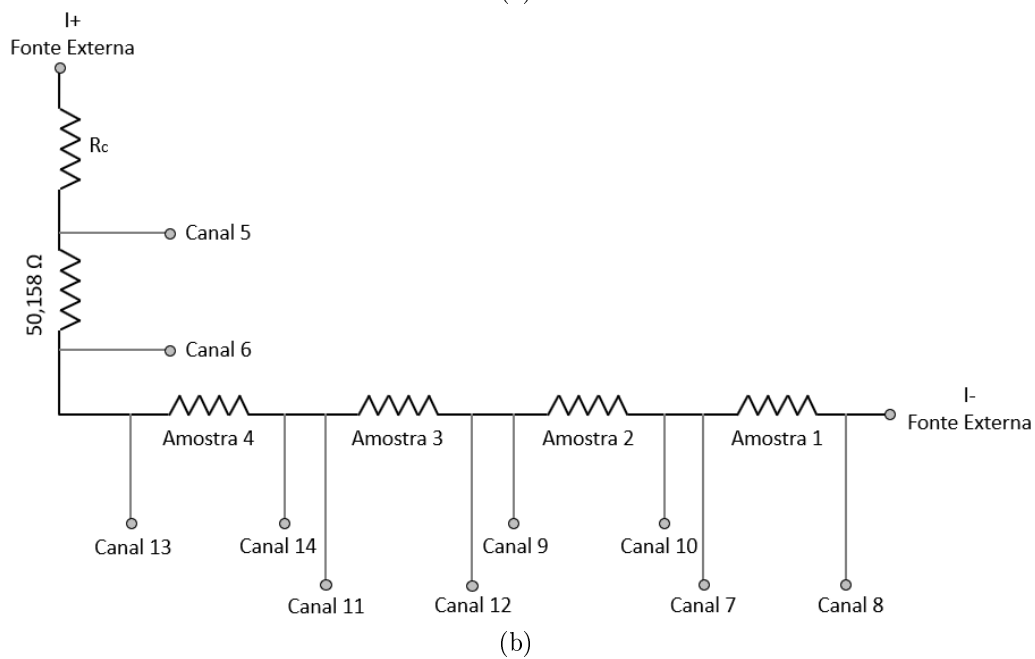
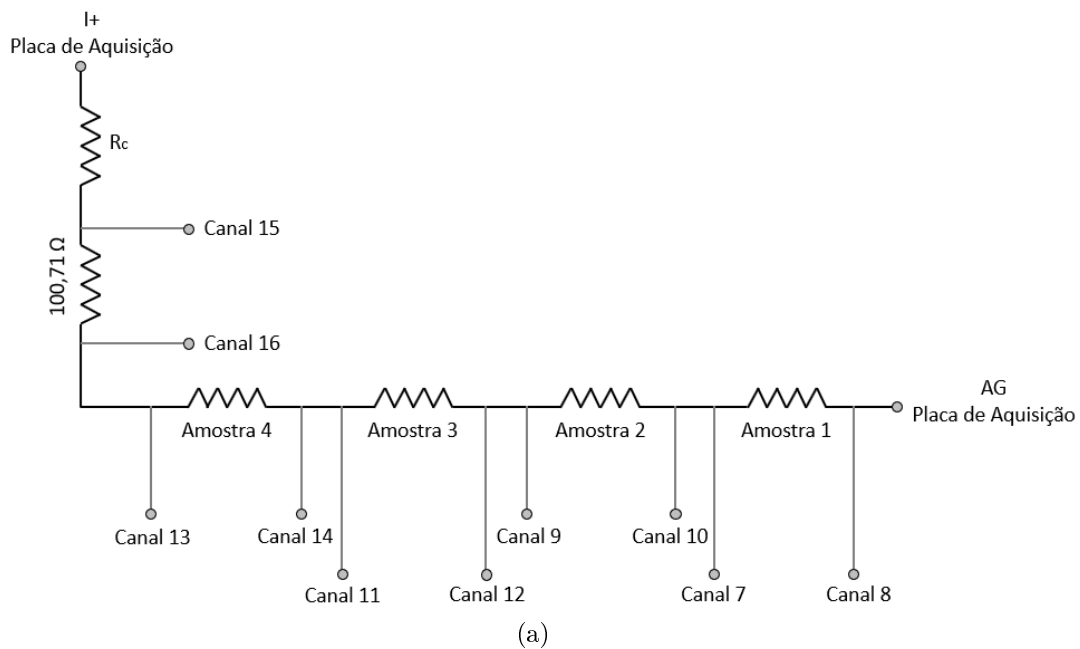


Figura 1: Esquemas do sistema: a) Esquema do sistema quando a corrente é produzida pela Placa de Aquisição PicoLog ADC-24 e b) Esquema do sistema quando a corrente é produzida por uma fonte externa.

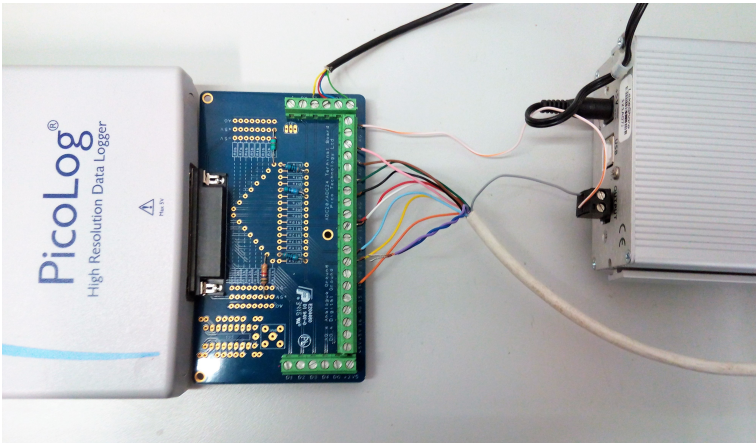


Figura 1: Esquema da Placa do ADC-24.

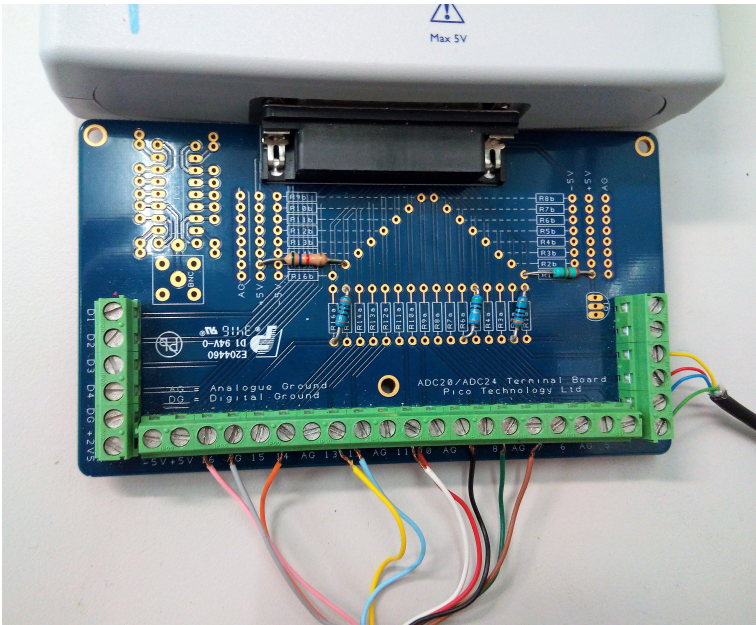


Figura 1: Esquema da Placa do ADC-24.

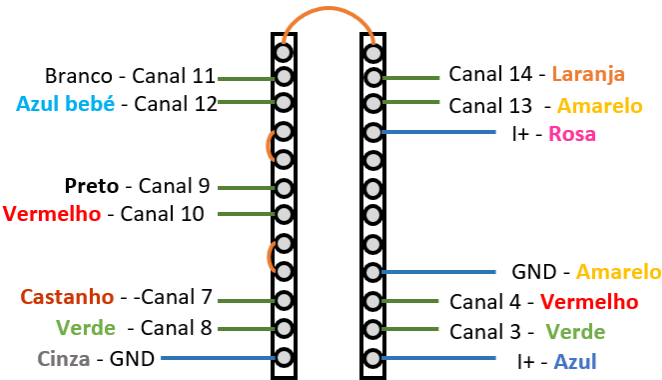


Figura 1: Esquema da Placa do ADC-24.

B Anexo II: Placa de Aquisição - PicoLog ADC-24

A Placa PicoLog ACD-24 foi escolhida, pois esta placa de aquisição tem 24 bits de resolução e várias escalas de aquisição de tensões (0 ± 39 mV até $0 \pm 2,5$ V) para cada canal, o que permite realizar as medições com boa precisão sobre uma grande gama de valores. Esta valência é extremamente importante para a medição de Resistividades, pois a Resistência dos fios medidos é muito baixa ($\leq 5 \Omega$) e varia bastante entre amostras.

A placa é constituída por dezasseis canais simples que podem ser utilizados como oito canais diferenciais. Neste trabalho os canais foram utilizados na sua forma diferencial, permitindo medir a diferença de potencial entre os terminais da amostra.

As saídas de +5V e -5V terão um papel fundamental no nosso trabalho, pois serão utilizadas para gerar correntes utilizada para medir a resistência da platina e das amostras, havendo também a possibilidade da corrente das amostras ser fornecida por uma fonte externa.

Na Figura 1 podemos perceber qual o esquema da placa do PicoLog ADC-24. Nesta placa foram soldadas cinco resistências, duas delas usadas para reduzir a corrente pois as fontes de corrente presentes na placa apenas podem fornecer até 2 mA de corrente. E as outras três resistências são utilizadas para calcular as correntes que passam pelas amostras ou pela platina que está a medir a temperatura. Os valores das resistências e as suas posições estão nas Figuras 1 e Figura 1 do Anexo A.

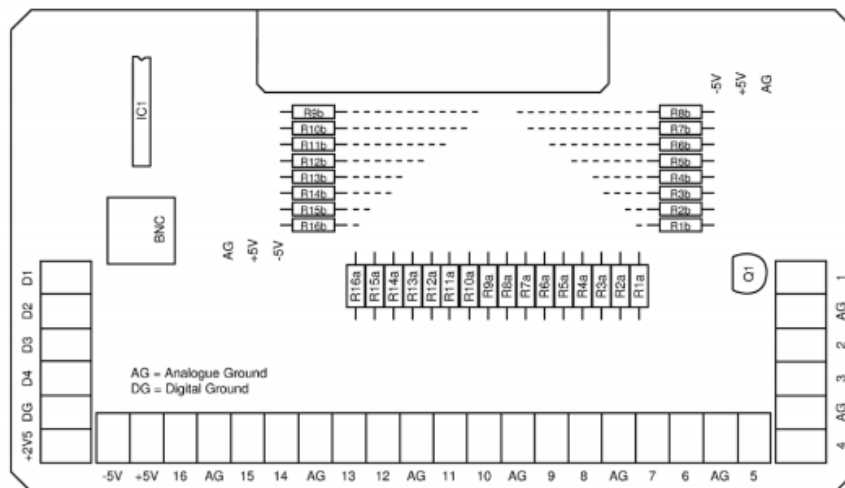


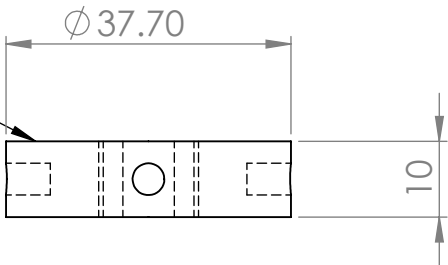
Figura 1: Esquema da Placa do ADC-24.



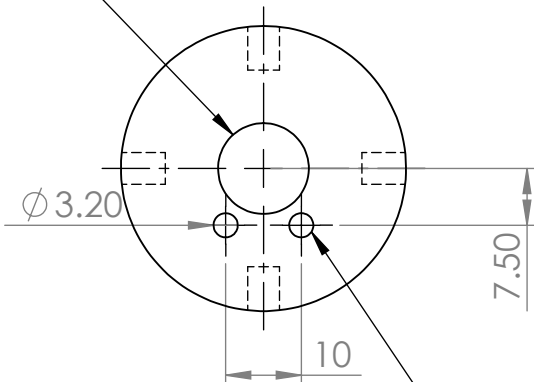
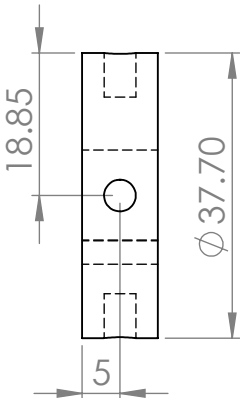
PEÇAS DA CÉLULA TÉRMICA

No presente apêndice apresentam-se os desenhos a 2D das peças que formam a nossa célula térmica. Estes desenhos foram elaborado no software *SolidWorks*

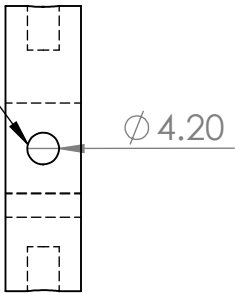
Medida do diametro ajustável
ao diametro da peça 4



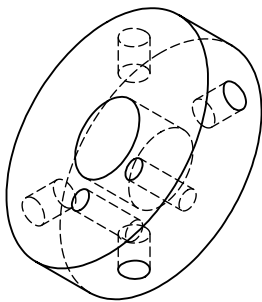
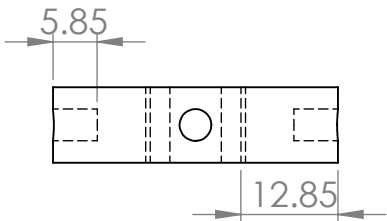
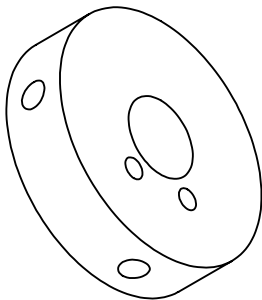
M12 x 1.5



Para colocar helicoils M4



Furos para colocar helicoils M3



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					

TITLE: Peça que será aparafusada na peça 2
e na peça 4

DWG NO.

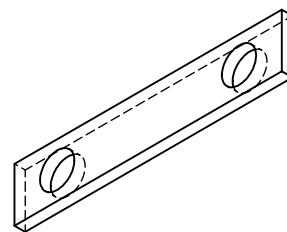
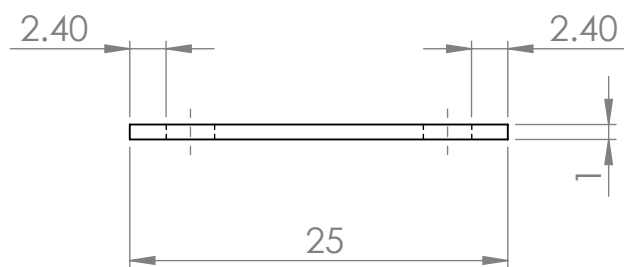
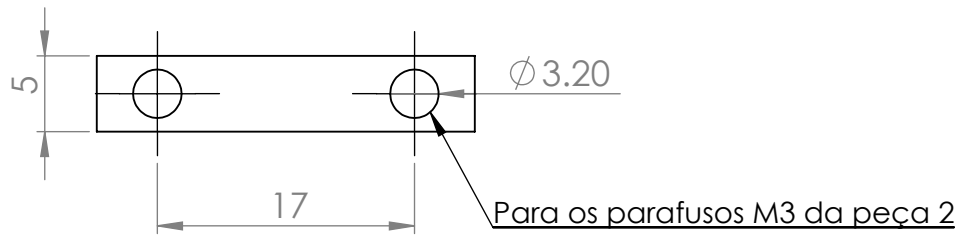
Peça 1

A4

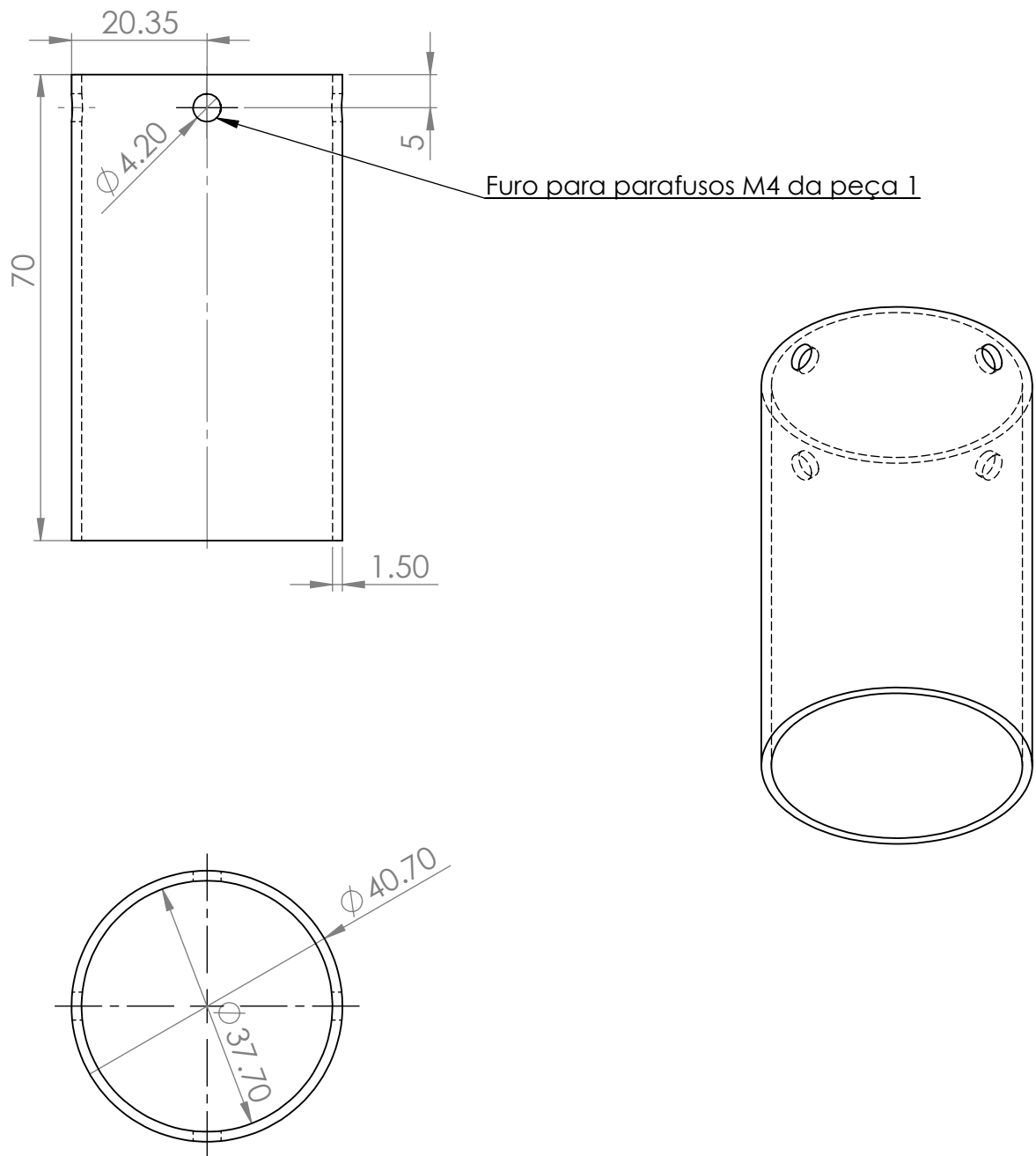
WEIGHT:

SCALE:1:1

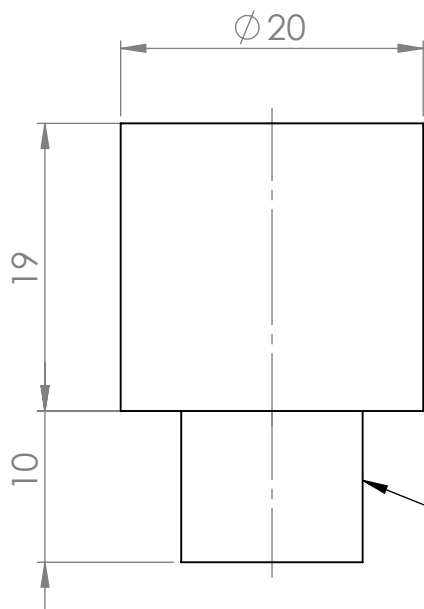
SHEET 1 OF 1



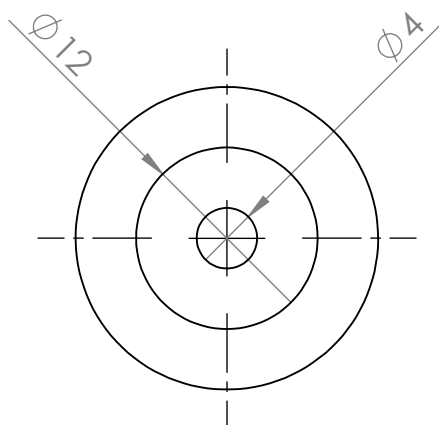
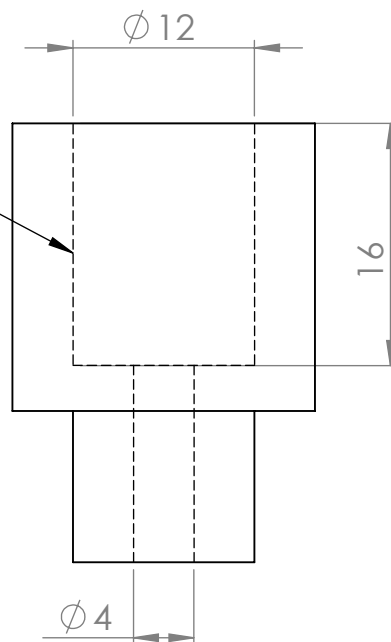
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE: Peça com o objetivo de prender os conectores à peça 1, será aparafusada à peça 1	
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.	
								peça 3	
								A4	
						WEIGHT:		SCALE:2:1	
								SHEET 1 OF 1	



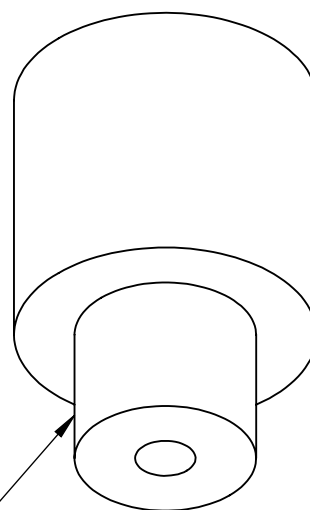
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
		NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE: Proteção da célula Será aparafusada a peça 1		
DRAWN									
CHK'D									
APPV'D									
MFG							DWG NO. Peça 4		
Q.A									
					MATERIAL:		A4		
					WEIGHT:		SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1



Local onde será colado
o tubo de acrílico



M12 X 1.5



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					

MATERIAL:

WEIGHT:

TITLE:

Peça que fará a ligação entre a
peça 1 e o tubo de acrílico.

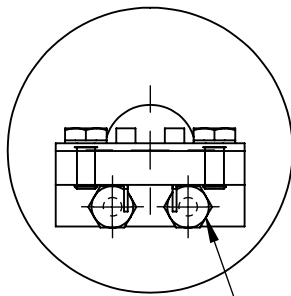
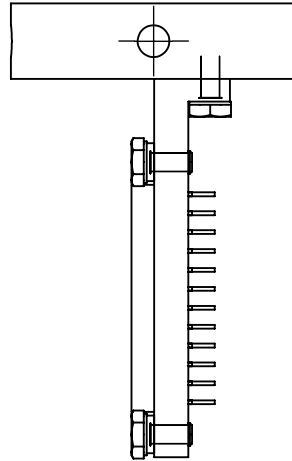
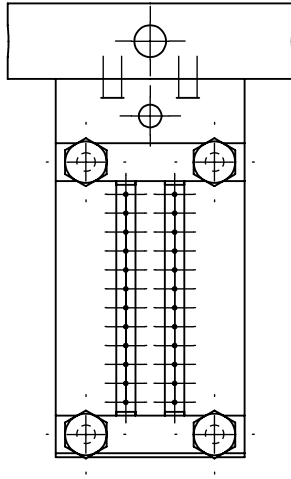
DWG NO.

peça 5

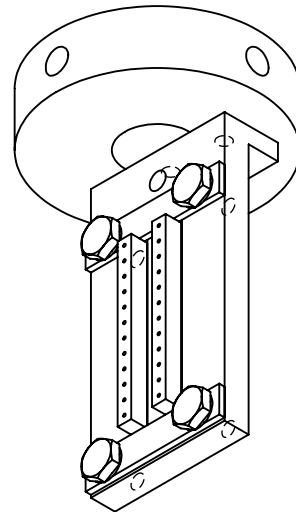
A4

SCALE:2:1

SHEET 1 OF 1



Serão usados parafusos
com cabeça redonda
5,5mm de diametro



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE: Conjunto de peças s/ o invólucro	
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.	
								conjunto de peças ^{A4}	
						WEIGHT:		SCALE:1:1	
								SHEET 1 OF 1	

A N E X O



**DATASHEET DA PLACA DE AQUISIÇÃO PICOLOG
ADC-24**

We use cookies to track visits to our website, not to store personal details. [ACCEPT COOKIES](#) [Our policy](#)

ADC-20 & ADC-24 Specifications

	ADC-20	ADC-24
Resolution	20 bits	24 bits
Number of channels[#]	4 differential / 8 single-ended	8 differential / 16 single-ended
Conversion time (per channel)	660 ms, 340 ms, 180 ms, 100 ms, 60 ms	
Voltage ranges	±2500 mV ±1250 mV	±2500 mV ±1250 mV ±625 mV ±312 mV ±156 mV ±78 mV ±39 mV
Accuracy	0.2%	0.1% (±39 mV to 1250 mV range) 0.2% (±2500 mV range)
Noise rejection	120 dB typical at 50/60 Hz	
Input impedance	Differential: 2 MΩ Single-ended: 1 MΩ	
Common mode input range, channel to common	±1.9 V (±39 mV to ±1250 mV ranges) ±3.0 V (±2500 mV range)	
Common mode input range, common to earth ground	±30 V	
Common mode rejection ratio, channel to common	95 dB (DC to 60 Hz)	
Common mode rejection ratio, common to earth ground	> 125 dB (DC to 60 Hz)	
Overvoltage protection	±30 V	
Digital I/O	none	4 bidirectional (3.3 V CMOS) Output level, high: > 2.40 V Output level, low: < 0.40 V Input level, high: > 2.20 V Input level, low: < 0.88 V

	ADC-20	ADC-24
Reference output	+2.5 V \pm 2.5 mV @ 2 mA +5 V \pm 1.0 V @ 2 mA -5 V \pm 1.5 V @ 2 mA	

The ADC-20 and ADC-24 have four and eight true differential input channels respectively. For flexibility each of these channels can be configured as either one differential channel or two single-ended channels.

PC requirements	
Minimum	Processor: 1 GHz. Memory: 512 MB. Free disk space: 32-bit: 600 MB, 64-bit: 1.5 GB. Operating system: 32-bit or 64-bit edition of Microsoft Windows 7, Windows 8 or 10. Ports: USB 1.1.
Recommended	Processor: 1 GHz. Memory: 512 MB. Free disk space: 32-bit: 850 MB, 64-bit: 2 GB. Operating system: 32-bit or 64-bit edition of Microsoft Windows 7, 8 or 10. Ports: USB 1.1 or higher.

Environmental	
For quoted accuracy	20 °C to 30 °C
General operation	0 °C to 45 °C
Relative humidity	5% to 80% RH

Physical properties	
Dimensions	135 x 184 x 36 mm (5.31 x 7.24 x 1.41 in)

Software	

Software	
PicoLog for Windows	<p>PicoLog data acquisition software can collect up to 1 million samples. Features include:</p> <p>Multiple views — view data as a graph, spreadsheet or text</p> <p>Parameter scaling — convert raw data into standard engineering units</p> <p>Math functions — use mathematical equations to calculate additional parameters</p> <p>Alarm limits — program an alert if a parameter goes out of a specified range</p> <p>IP networking — transfer measurements via a LAN or over the Internet</p> <p>Operating systems supported: Microsoft Windows 7 to 10</p>
PicoLog languages	<p>Full support for: English, Français, Deutsch</p> <p>Menus and dialogs only for: Italiano, Español, Svenska</p>
Software Development Kit	Includes example code.
Optional free software	Drivers for Linux and OS X.
Documentation languages	
Documentation User's guide Installation guide	<p>English, Français, Deutsch, Italiano, Español</p> <p>English, Français, Deutsch, Italiano, Español, Svenska, Nederlandse, Dansk</p>
General	
Additional hardware (supplied)	USB 2.0 cable, user manuals, software CD-ROM
PC interface	USB 1.1
I/O connector	25-way D female
Power requirements	Powered from USB port
Compliance	European EMC and LVD standards FCC Rules Part 15 Class A
Total satisfaction guarantee	In the event that this product does not fully meet your requirements you can return it for an exchange or refund. To claim, the product must be returned in good condition within 14 days.
Warranty	5 years